

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Bruno Cerovečki

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Bruno Cerovečki

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, pomoći, strpljenju i stručnom vođenju kroz izradu završnog rada.

Zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na velikoj pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije na omogućavanju izvođenja eksperimentalnog rada kao i na njihovoj pomoći.

Bruno Cerovečki



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 23-02-2017. Prilog
Klasa: 602-04/17-6/4
Ur.broj: 15-1703-17-81

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: BRUNO CEROVEČKI

Mat. br.: 0035192025

Naslov rada na hrvatskom jeziku: MOKRO PODVODNO ZAVARIVANJE MARTENZITNOG ČELIKA X3CrNiMo13-4

Naslov rada na engleskom jeziku: UNDERWATER WET WELDING OF MARTENSITIC STEEL X3CrNiMo13-4

Opis zadatka:

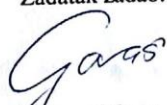
Opisati postupke koji se primjenjuju za reparaturno mokro podvodno zavarivanje. Proučiti osnovne značajke zavarljivosti visokolegiranih martenzitnih čelika i navesti glavne probleme koji se mogu javiti pri mokrom podvodnom zavarivanju obzirom na povećani sadržaj difundiranog vodika i veliku brzinu hlađenja. Analizirati specifičnosti dodatnih materijala koji se koriste za REL mokro podvodno zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu za osnovni materijal X3CrNiMo13-4 provesti mokro podvodno zavarivanje REL postupkom. Odrediti parametre zavarivanja te ocijeniti utjecaj višeprolaznog zavarivanja na tvrdoću u zoni utjecaja topline. Zaključno donijeti preporuke za mokro podvodno zavarivanje martenzitnih čelika u realnim uvjetima.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:


Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

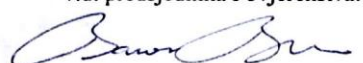
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. PODVODNO ZAVARIVANJE	2
2.1. Suho podvodno zavarivanje	2
2.2. Mokro podvodno zavarivanje	3
2.2.1. Problematika mokrog podvodnog zavarivanja	4
2.2.2. Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom	6
2.2.2.1. Uspostava električnog luka	7
2.2.2.2. Tehnike rada.....	8
2.2.2.3. Osnovne karakteristike.....	9
2.2.2.4. Dodatni materijali za REL postupak.....	10
2.2.3. Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom.....	14
2.2.3.1. Fizičke osnove i karakteristike mokrog podvodnog FCAW postupka	14
2.2.3.2. FCAW-S postupak mokrog podvodnog zavarivanja	15
2.2.3.3. FCAW-G postupak mokrog podvodnog zavarivanja	15
2.2.4. Napredne tehnologije mokrog podvodnog zavarivanja	16
2.2.4.1. Mokro podvodno zavarivanje FSW postupkom-UFSW.....	17
2.2.4.2. Mokro podvodno lasersko zavarivanje-ULBW	18
2.2.5. Problemi kod mokrog podvodnog zavarivanja	21
2.2.6. Utjecaj parametara mokrog podvodnog REL zavarivanja na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju	25
3. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH MARTENZITNIH ČELIKA	27
3.1. Općenito o martenzitnim čelicima	27
3.2. Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika i njihova mikrostruktura	28
3.3. Mekomartenzitni čelici	29
4. EKSPERIMENTALNI DIO	31
4.1. Opis eksperimenta.....	31
4.1.1. Priprema uzorka	32
4.1.2. Mokro podvodno REL zavarivanje.....	34
4.1.3. Ispitivanje uzorka penetrantima	39
4.2. Analiza makroizbruska	40
4.3. Mjerenje tvrdoće i analiza rezultata	42

5. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	49
PRILOZI.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1. Automatizirano zavarivanje rukavca [4]	3
Slika 2. Prva testiranja mokrog podvodnog zavarivanja [5]	3
Slika 3. Primjer podvodnog mokrog zavarivanja [7]	4
Slika 4. Osnovna oprema za REL podvodno zavarivanje [10]	7
Slika 5. Prikaz električnog luka uspostavljenog pod vodom [10].....	8
Slika 6. <i>Self-consuming</i> tehnika rada mokrog podvodnog REL-a kod zavarivanja horizontalnog kutnog spoja [10]	9
Slika 7. Rutilne elektrode za mokro podvodno zavarivanje s dvostrukim vodonepropusnim premazom [11]	12
Slika 8. Shematski prikaz disipacijskih strujnih tokova [15]	13
Slika 9. Shematski prikaz FCAW-S mokrog podvodnog zavarivanja [17]	14
Slika 10. Shematski prikaz FCAW-G mokrog podvodnog zavarivanja [16].....	16
Slika 11. UFSW postupak mokrog podvodnog zavarivanja [19].....	17
Slika 12. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja laserom s dodatnom žicom [18]	19
Slika 13. Shematski prikaz a) kondukcijski rastaljenog metala b) duboko penetracijsko lasersko zavarivanje [17]	20
Slika 14. Shema eksperimentalnog postupka mokrog podvodnog laserskog zavarivanja [17]	21
Slika 15. Usporedba brzina hlađenja pri suhom zavarivanju (gornji dijagram) i mokrom podvodnom zavarivanju (donji dijagram) [6]	23
Slika 16. Dijagram ovisnosti $t_{8/5}$ o unosu topline za zavarivanje u normalnim uvjetima i pri mokrom podvodnom zavarivanju obloženom elektrodom; osnovni materijal St 37-2, debljina 20mm; mokro podvodno zavarivanje ○- rutilno-celulozna obloga, ● rutilna obloga; x-zavarivanje u normalnim uvjetima, rutilna obloga [11].....	24
Slika 17. Utjecaj jačine struje na topljivost vodika u metalu zavara [16].....	25
Slika 18. Utjecaj napona na topljivost vodika u metalu zavara [16].....	25
Slika 19. Prikaz četiri zone ZUT-a prilikom zavarivanja martenzitnog čelika [22]	28
Slika 20. Bazen za podvodno zavarivanje.....	32
Slika 21. Rezanje ploča zračnom plazmom.	33
Slika 22. Zavarivanje pripoja MAG postupkom	33
Slika 23. Izvor struje za zavarivanje i njegove karakteristike.....	35
Slika 24. Kutni spoj pripremljen za zavarivanje	37
Slika 25. Pozicioniranje držača elektrode za početak zavarivanja kutnog spoja	37
Slika 26. Mokro podvodno REL zavarivanje kutnog spoja	38
Slika 27. Dobiveni zavareni kutni spoj	38
Slika 28. Rezultati penetrantskog ispitivanja	39
Slika 29. Rezanje viška dijelova ploča kutnog spoja	40
Slika 30. Rezanje makroizbruska tračnom pilom.....	40
Slika 31. Nagrizanje površine makroizbruska otopinom KALLING	41
Slika 32. Makroizbrusak	42
Slika 33. Tvrdomjer Reicherter TM12	42
Slika 34. Raspored mjernih mjesta za ispitivanje tvrdoće na zavarenom spoju	43
Slika 35. Grafički prikaz tvrdoća zavara 1	45
Slika 36. Grafički prikaz vrijednosti tvrdoća zavara 2	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X3CrNiMo13-4 [24]	32
Tablica 2. Kemijski sastav metala zavara elektrode Lastek 1008 [6]	34
Tablica 3. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [6].....	34
Tablica 4. Parametri zavarivanja.....	35
Tablica 5. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća zavara 1	43
Tablica 6. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća zavara 2	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$T_{E.L.}$	K	Temperatura električnog luka
U_0	V	Napon praznoga hoda izvora struje za mokro podvodno zavarivanje
q	J/mm	Unos topline
v_{REL}	cm/min	Brzina zavarivanja REL postupkom
η_{REL}	-	Stupanj iskorištenja postupka REL zavarivanja

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
ZUT	Zona utjecaja topline
MIG	Metal inert gas
FCAW	Flux cored arc welding
ULBW	Underwater laser beam welding
UFSW	Underwater friction stir welding
SCC	Stress corrosion cracks
ISO	International organization for standardization
CNC	Computer numerical control

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je „Mokro podvodno zavarivanje martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4“. Sastoji se od dva dijela, teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu prikazan je REL postupak mokrog podvodnog zavarivanja, kao i neki drugi postupci koji su prisutni u praksi ili su u trenutnom razvoju. Posebno je analiziran princip rada i problematika zavarivanja. Opisani su problemi koji se javljaju u procesu zavarivanja pod vodom, tehnike rada, materijal koji se zavaruje, kao i njegova svojstva i zavarljivost.

U eksperimentalnom dijelu rada opisana je oprema, dodatni materijal i neke od metoda kontrole kvalitete zavarenog spoja. Izrađen je plan pokusa kojim se definirala mogućnost izvedbe mokrog podvodnog REL zavarivanja, utjecaj unosa topline na tvrdoću u zoni utjecaja topline kako bi se mogle donijeti preporuke za podvodno zavarivanje martenzitnih čelika.

Ključne riječi: mokro podvodno zavarivanje, REL, tvrdoća, zavarljivost

SUMMARY

Topic of this thesis is „Underwater wet welding of martensitic steel X3CrNiMo13-4“. It consists of two parts, theoretical and experimental.

In the theoretical part MMA underwater wet welding is described and some other processes of underwater wet welding which were used and developed recently. Working principle and problems of welding are especially analyzed. Problems that occur, some working techniques, materials which need to be welded as well as its properties and weldability are described too.

Equipment, additional materials and weld controls are described in the experimental part. Experimental plan was made so it could be defined if it is possible to use MMA underwater wet welding. Influence of heat input on material hardness in the heat affected zone also need to be defined. At the end, the recommendations for underwater wet welding of martensitic steel need to be represented.

Key words: underwater wet MMA welding, hardness in HAZ, weldability

1. UVOD

Osnovu ekonomskoga i strateškog razvoja predstavljaju i brojne podvodne konstrukcije koje se koriste u proizvodnji nafte i plina kao i povećanje intenziteta pomorskoga prijevoza. Održavanje konstrukcije ili eventualni popravci ispod vode zahtijevaju primjenu odgovarajućih tehnologija, kao što je, npr., mokro podvodno zavarivanje, koje će se kroz daljnji rad detaljnije obraditi. Dobro uvježban i educiran tim ljudskih resursa, uključujući zavarivače i organizacijski tim na „površini“, odlučujući su u ostvarivanju visoke sigurnosti na radu te su nosioci velike odgovornosti u obavljanju ovakvih poslova. Dugo vremena su podvodne tehnike zavarivanja bile sinonim za „loše zavarivanje“ koje se karakteriziralo velikoj poroznosti, pukotinama, te niskim udarnim radom loma i sklonosti pucanju. Razlozi tome bili su korištenje neodgovarajuće zavarivačke procedure, neuvježbani zavarivači i primjena neprikladnih elektroda. S vremenom se taj status uvelike promijenio, a promijenjen je i pristup projektima za podvodno zavarivanje s naglaskom na visok stupanj osiguranja kvalitete.

Materijali koji se najčešće zavaruju su čelici za cjevovode i *off-shore* konstrukcije. Ručno elektrolučno mokro podvodno zavarivanje je najfleksibilnija i najekonomičnija tehnologija za popravke i održavanje. Da bi se postigla prihvatljiva kvaliteta podvodnog zavarivanja, potrebno je zadovoljiti tri osnovne značajke. Prvo, dobro uvježbani i educirani radnici zavarivači su temelj aktivnosti podvodnog zavarivanja. Upućuje se na to da nepravilna tehnika zavarivanja uzrokuje pojavu povećanog udjela vodika koji je jedan od najvećih problema kao i poroziteta u metalu zavara. Poznat problem u podvodnom zavarivanju su uključci troske, što je posljedica lošeg nagiba elektrode i veće brzine zavarivanja. Drugo, potrebne su dobre i adekvatne elektrode, a kao treći faktor uzimaju se odgovarajući izvori za zavarivanje koji moraju osigurati dobre parametre zavarivanja [1].

Čelici u kojima se pojavljuju legirni elementi poput Cr, Ni i sl. pokazuju odličnu korozijsku otpornost, ali se ipak u eksploataciji pokazalo da može doći do odvijanja vrlo brzih lokalnih korozijskih procesa te konačnog razaranja konstrukcije, posebice na područjima na kojima su prisutna tzv. toplinska obojenja nastala prilikom zavarivanja. Stoga treba obratiti pozornost i na taj aspekt prilikom samog zavarivanja i plasiranja konstrukcije u upotrebu [2].

2. PODVODNO ZAVARIVANJE

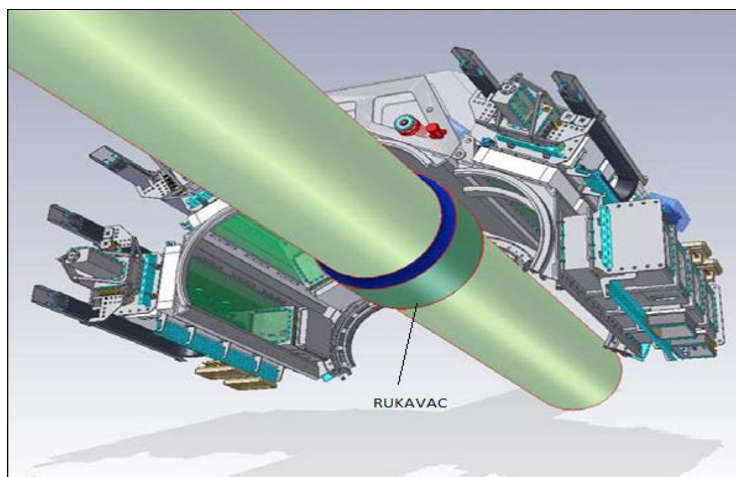
Podvodno zavarivanje može se podijeliti u dvije tehnike izvođenja, odnosno prema atmosferi u kojoj se zavarivanje primjenjuje. Suho podvodno zavarivanje izvodi se u atmosferi zraka ili inertnog plina pri čemu tlak može biti povišen ili jednak atmosferskom, unutar posebne komore tzv. habitata. Mokro podvodno zavarivanje pak podrazumijeva da se proces zavarivanja provodi direktno u vodi bez ikakve izolacijske barijere koja bi sprječavala kontakt okolne vode s mjestom rada, talinom, električnim lukom, dodatnim materijalom i samim zavarivačem [6].

2.1. Suho podvodno zavarivanje

Kod suhih tehnika, zavarivanje se odvija unutar raznih izvedbi podvodnih kutija za zavarivanje, podvodnih komora ili pri hiperbaričkom tlaku. Na kvalitetu dobivenih zavarenih spojeva i na sam proces zavarivanja utječu vrsta plinovite atmosfere i ambijentalni tlak. Komprimirani zrak i mješavine za disanje na bazi dušika imaju u pravilu negativan utjecaj na strukturu, svojstva i kvalitetu zavarenih spojeva. Najčešće se kao plinovita atmosfera za disanje koriste smjese na bazi kisika i helija, a kao zaštitni plin koristi se argon [3]. Porastom dubine mjesta zavarivanja raste i udio helija u plinskoj atmosferi.

Kvaliteta zavarenih spojeva dobivenih suhim tehnikama zavarivanja je dobra i ponekad jednaka kvaliteti spojeva zavarenih na kopnu jer je moguće postići A i O klase zavara prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999. Ovako visoku kvalitetu zavara postiže se ne samo zahvaljujući okolnim uvjetima (zaštitna atmosfera, hlađenje zavara na zraku), već i zbog mogućnosti predgrijavanja i naknadne toplinske obrade nakon zavarivanja.

Sama cijena izvedbe suhog podvodnog zavarivanja puno je veća od cijene izvedbe mokrog podvodnog zavarivanja. Razlog tome je potreba za puno sofisticiranijom i tehnički zahtjevnijom opremom, kao što je prikazano slikom 1. koja prikazuje hiperbaričko zavarivanje cjevovoda [4].



Slika 1. Automatizirano zavarivanje rukavca [4]

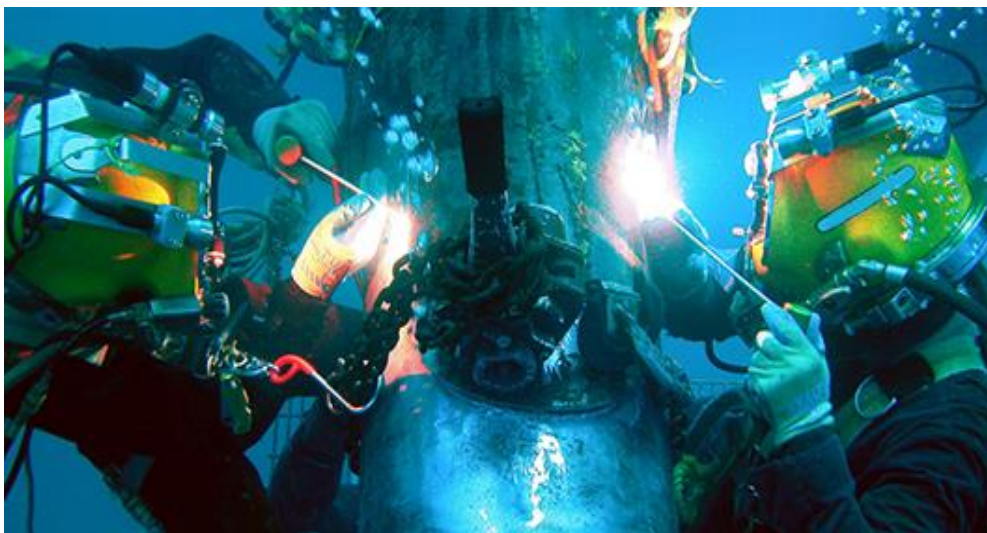
2.2. Mokro podvodno zavarivanje

Prvi izvještaji koji spominju primjenu podvodnog rezanja potječu iz 1918. godine gdje se opisuju popravci na parnom brodu St. Paul [3]. Do 1932. godine podvodno zavarivanje smatralo se samoubojstvom, odnosno uspostava električnog luka u vodi bila je nezamisliva. Rad ruskoga inženjera Konstantina Khrenova bio je prekretnica u razvoju ove vrste zavarivanja. On je naime otkrio bitnu činjenicu da je najveća prepreka uspješnom mokrom zavarivanju u nekontroliranom odljevu mjehurića plina s točke dodira metala i električnog luka. Uz suradnju s drugim znanstvenicima, osmislio je vodootporni premaz za elektrodu i stabilniji izvor struje za zavarivanje nakon čega počinju prva uspješna testiranja u laboratoriju, a i u moru prikazani na slici 2.. Prve konkretne primjene javljaju se u drugome svjetskome ratu, kada su Sovjeti koristili mokro podvodno zavarivanje za podmorna vozila, brodove, izgradnju luka i sl. [5].



Slika 2. Prva testiranja mokrog podvodnog zavarivanja [5]

Slika 3. prikazuje primjer reparaturnog mokrog podvodnog zavarivanja, što je ujedno i glavna karakteristika ovog postupka. Drugim riječima, podvodno mokro zavarivanje se u velikoj mjeri koristi za reparaturu zavarenih spojeva.



Slika 3. Primjer podvodnog mokrog zavarivanja [7]

2.2.1. Problematika mokrog podvodnog zavarivanja

Proces zavarivanja u vodi bez ikakve izolacijske barijere između taline, električnog luka, dodatnog materijala, zavarivača i same vode dovodi do niza utjecajnih parametara. Posljedica toga je nemogućnost primjene svih postupaka elektrolučnog zavarivanja jer i sam hidrostatski tlak, kao i strujanje vode ponekad predstavljaju fizička ograničenja koja sprječavaju npr. primjenu klasičnog elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u plinskoj zaštiti. Kod mokrog podvodnog zavarivanja popis adekvatnih materijala pogodnih za zavarivanje relativno je sužen. Sam materijal koji se zavaruje mora imati niski ekvivalent ugljika, a uz njih pogodni su i austenitni čelici. Novije generacije materijala kod suhog zavarivanja zahtijevaju tehnološku disciplinu i čim točnije, odnosno optimalne parametre, a u nekim slučajevima potrebno je i predgrijavanje materijala. Odstupanje od navedenog lako može rezultirati neželjenom promjenom mehaničkih svojstava. Uzimajući u obzir prethodno navedeno, može se zaključiti da se takvi uvjeti mogu ostvariti kod suhog podvodnog zavarivanja, ali kod mokrog to je neizvedivo ili pak zahtijeva velika financijska sredstva, što dovodi do upitne ekonomičnosti. Nepoznavanje utjecajnih faktora može dovesti do havarije podvodne konstrukcije.

Dva najznačajnija problema koja se javljaju kod mokrog podvodnog zavarivanja jesu visoka koncentracija vodika u metalu zavara i ubrzano hlađenje zavara. Ta dva faktora u najvećoj mjeri utječu na kvalitetu ostvarenog zavarenog spoja i njegova mehanička svojstva. Negativna posljedica tih utjecajnih faktora manifestira se u obliku hladnih pukotina [6].

Neposredni dodir zavara s vodom predstavlja intenzivno hlađenje, rastaljeni metal zasićuje se s velikom količinom vodika, a također se otežava proces formiranja zavara. Zajedničko djelovanje vodika i brzog hlađenja dovodi do gubitka plastičnosti i raste vjerojatnost nastanka krhkih pukotina. Istovremeno velika količina otopljenih plinova u rastaljenom metalu stvara poroznost zbog velike brzine skrućivanja. Sve ove pojave detaljnije će se objasniti u daljnjim poglavljima.

Jedna od odlika ovog tipa zavarivanja je također i viša cijena u usporedbi sa sličnim radovima koji se primjenjuju na kopnu. Cijene mogu dostići čak i za jedan red veličine više iznose. Odgovorniji spojevi podvodnih konstrukcija izvode se prvenstveno suhim podvodnim zavarivanjem (izobarički ili hiperbarički način) [8].

Mokro podvodno zavarivanje u praksi se najčešće koristi, upravo zbog toga jer je ekonomičnije od suhog podvodnog zavarivanja, a ujedno ga karakterizira jednostavnost izvođenja. Zbog već prije navedenog brzog hlađenja, koristi se za spojeve slabijih mehaničkih zahtjeva. Oprema je slična onoj koja se koristi na suhom uz određene prilagodbe, nužne zbog sigurnosti. Dodatni materijal također mora biti prilagođen, odnosno elektrode moraju biti obložene materijalom koji osigurava kvalitetnu lokalnu atmosferu električnog luka i njegovu stabilnost. Veliku važnost i ulogu imaju i otežani uvjeti koji moraju biti jasno definirani prije samog izvođenja radova, a to su:

- dubina koja znatno utječe na sam proces, kao i na ronioca
- temperatura, čiji se utjecaj na ronioca smanjuje ili u potpunosti uklanja zaštitnim odijelom
- vidljivost, jedan od najvećih problema jer ronionci zavarivači često moraju raditi percipirajući prema opipu
- struja, odnosno intenzitet gibanja vode koje može biti jednosmjerno ili višesmjerno

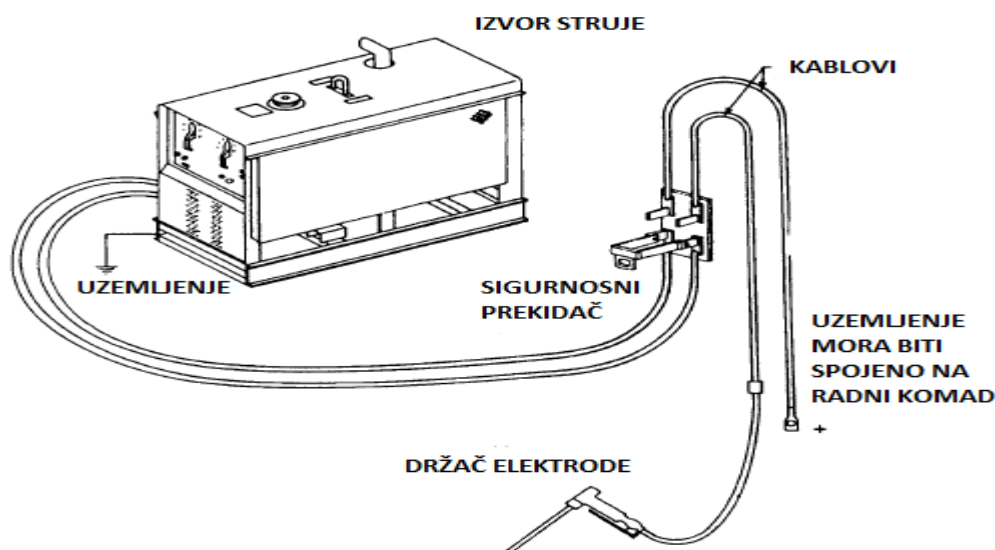
- opasne životinje
- prostor i otežani uvjeti (npr. uski, zatvoreni, zagađeni prostori).

Do 40 m, problemi zavarivanja nisu tako kompleksni, no vrijednosti iznad navedene zahtijevaju puno složeniju ronilačku opremu, što rezultira eksponencijalnim rastom cijene radova. Granica izvođenja mokrog zavarivanja je 60 m, a razlog tome je što na tim ili višim dubinama okolni (hidrostatski) tlak postaje previsok za razvijanje kvalitetne zaštitne atmosfere električnog luka [9].

Glavni otežavajući čimbenici u ronilačkim akcijama su oni koji utječu na sigurnost ronioca, a i indirektno na uspješnost izvođenja operacije. U fazi planiranja, prvo treba razmotriti uvjete izvođenja, a nakon toga utjecaj okoline na sam tehnološki proces. Glavni cilj je osmisлити i unaprijediti sustave kojima te utjecaje smanjujemo ili čak potpuno eliminiramo. Osim opreme koja nam u tome uvelike pomaže, kvaliteta kadra također ima veliki utjecaj [9].

2.2.2. Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom

Zbog dobre primjenjivosti i prilagodljivosti, postupak REL je najčešće korištena tehnika za podvodno mokro zavarivanje. Postupak je vrlo rasprostranjen i koristi se kod popravaka oštećenih *off-shore* platformi. Zbog visokog stupnja topljivosti vodika, postoji mogućnost pojave loma, te u cilju prevencije istoga koriste se elektrode sa adekvatnim oblogama, kao i napredni izvori struje [1]. Slika 4. prikazuje osnovnu opremu potrebnu za uspješno provođenje REL postupka.



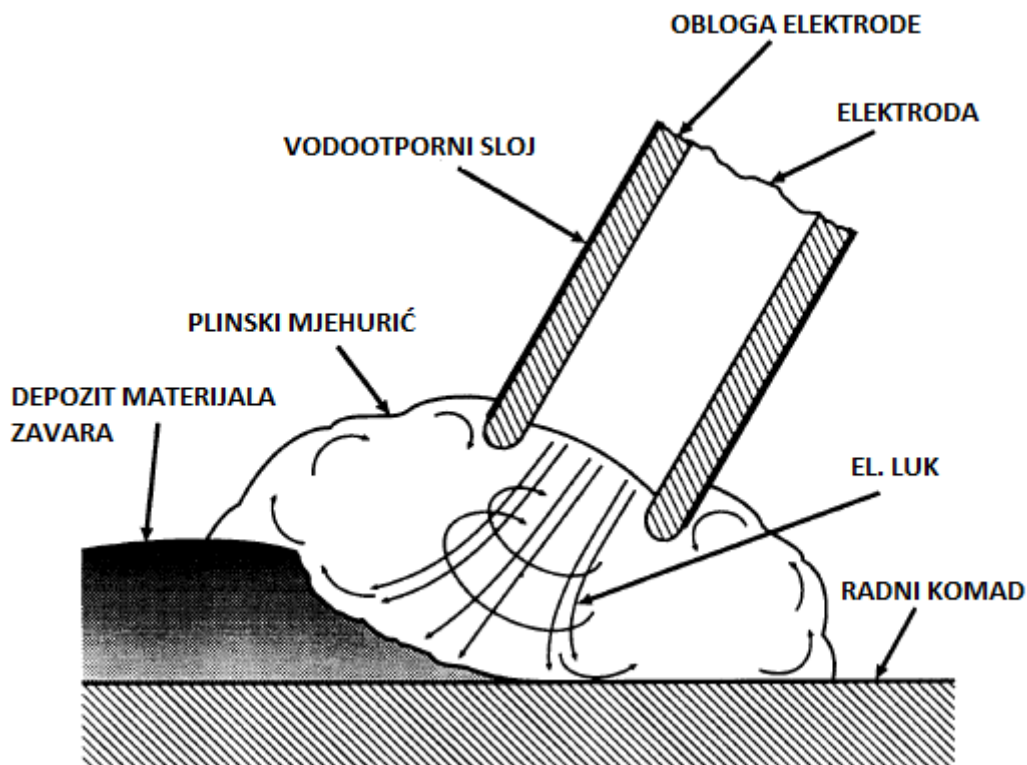
Slika 4. Osnovna oprema za REL podvodno zavarivanje [10]

Prema [10] REL postupak zavarivanja temelji se na uspostavi električnog luka između elektrode i radnog komada koji je koncentriran na vrlo uskom području. Rezultat procesa je taljenje osnovnog materijala, dodatnog materijala i njegove obloge. Primarna zadaća obloge elektrode je razgradnja i uspostava zaštitne plinske atmosfere oko električnog luka. Zaštitna atmosfera štiti talinu od kontaminacije okolnom atmosferom i njezinim nečistoćama. U procesu taljenja elektrode formiraju se kapljice, koje se deponiraju u osnovni materijal stvarajući pri tome talinu, koja se naknadno skrućuje i pri tome nastaje formirani zavareni spoj. Ronilac zavarivač mora biti svjestan da kapljice ne mogu biti unesene u talinu samo gravitacijskom silom, nego su potaknute i silom toka električne struje.

2.2.2.1. Uspostava električnog luka

Električni luk pod vodom „ponaša“ različito nego na suhoj površini. Aktivnost parnih mjehurića bitna je stavka u ostvarivanju uspješnog i kvalitetnog zavarenog spoja. U trenutku uspostave električnog luka stvaraju se plinski mjehurići prikazani na slici 5. Kako tlak u mjehurićima raste, isti su prisiljeni na izlazak iz područja električnog luka, te se miješaju s okolnom vodom, a istovremeno se stvaraju novi i zauzimaju mjesto prethodno nastalih. Zaključno, u trenutku kada tlak u mjehurićima postane veći od kapilarne sile, oni pucaju. Zbog navedenog procesa vrlo je bitno održavati pripadajući razmak elektrode od

radnog komada, kako ne bi došlo do pojava grešaka u zavaru. Također, ukoliko je brzina zavarivanja preniska javlja se mogućnost nekvalitetnih zavarenih spojeva.



Slika 5. Prikaz električnog luka uspostavljenog pod vodom [10]

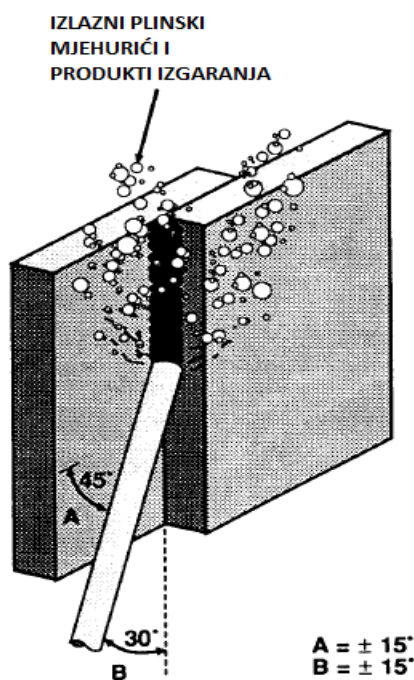
2.2.2.2. Tehnike rada

2.2.2.2.1. *Self-consuming* tehnika rada

Kod takve tehnike rada, ronilac zavarivač mora primijeniti znatno veći pritisak elektrode na radni komad. Radno iskustvo zavarivača ne treba biti najvišeg stupnja kao u nekim drugim tehnikama. Metal zavora je deponiran u više prolaza ili češće u jednom prolazu, a sama tehnika je idealna za kutno zavarivanje. Ispitivanja su pokazala da se širine zavora poklapaju sa promjerom elektrode. Razlikujemo tri osnovne pozicije zavarivanja, a to su horizontalni položaj, vertikalni položaj prikazan na slici 6. i nadglavni položaj kad je radni komad iznad zavarivača [10].

Self-consuming ili tehnika povlačenja radi na principu da u trenutku uspostave električnog luka, elektrodu se pritišće prema radnom komadu tolikom silom da se dopusti trošenje samo

od sebe, baš po potrebi. Pomoću ove tehnike moguće je npr. zavare širine od 5 mm zavariti u jednom prolazu s elektrodom promjera 5 mm, a zavareni spoj ima približnu čvrstoću kao i spoj s tri prolaza. Neke prednosti ove tehnike jesu smanjeno vrijeme zavarivanja, nema čišćenja troske između prolaza i jednostavno održavanje zavarenih spojeva. Tehnika je naročito povoljna u situacijama slabe vidljivosti i otežanih uvjeta rada [16].



Slika 6. *Self-consuming* tehnika rada mokrog podvodnog REL-a kod zavarivanja horizontalnog kutnog spoja [10]

2.2.2.2. Manipulativna tehnika rada

Kod manipulativne tehnike rada električni luk se održava na isti način kao i kod suhog zavarivanja, s malo ili čak i bez pritiska elektrode na radni komad. Ova metoda zahtijeva veliko iskustvo i rutinu zavarivača i samim time je puno kompleksnija od *self-consuming* tehnike.

2.2.2.3. Osnovne karakteristike

Prema [11] mokro podvodno zavarivanje REL postupkom karakterizira sljedeće:

- Nestabilnost električnog luka koja uzrokuje nepravilnosti geometrije zavarenog spoja, pojavu troske u metalu zavara, poroznost i nedovoljnu penetraciju. Okolni, odnosno hidrostatski tlak također utječe na ponašanje električnog luka, performanse zavarivačkog procesa i mehanička svojstva zavara. Znatna povećanja tlaka uzrokuju pojavu turbulencija u zoni električnog luka.
- Ubrzano hlađenje dovodi do viših iznosa tvrdoće, a niže čvrstoće spoja kao i do pojave poroznosti zbog zaostalih „zarobljenih“ plinskih mjehurića.
- Visoki iznos sadržanog vodika u području električnog luka i taline, što uzrokuje pojavu zaostalog vodika koji je zarobljen u metalu zavara i ZUT-u. Posljedica navedenog je povećanje vjerojatnosti za pojavom hladnih pukotina, poroznosti, kao i smanjenja mehaničkih svojstava spoja.
- Visoki iznosi sadržanog kisika u području el. luka i taline uzrokuju oksidaciju, poremećuje se odnos legiranih elemenata i narušavaju se mehanička svojstva spoja.
- Raspad, odnosno degradacija obloge elektrode rezultira nestabilnošću električnog luka i postoji vjerojatnost za pojavom poroznosti.

2.2.2.4. Dodatni materijali za REL postupak

Dodatni materijal kod REL mokrog podvodnog zavarivanja jesu vodootporne obložene elektrode. Proizvođači takvih vrsta elektroda ostvarili su značajan napredak sustava za proizvodnju [10]. Za uspostavljanje i održavanje el. luka potrebne su dobre elektrode. Glavna zadaća im je da osiguraju jednostavno uklanjanje troske i što je moguće nižu razinu otopljenog vodika. S aspekta operativnih značajki, rutilne elektrode dale su najbolje rezultate. Vodonepropusna obloga mora „izgarati“ istovremeno s elektrodom u cilju sprječavanja direktnog kontakta između vode i elektrode. Na smanjenje svojstava i kompaktnosti obloge utječu primjena premalih iznosa struje i kemijska agresivnost vode, što za posljedicu ima pojavu nestabilnosti luka, pa čak i njegovo prekidanje. Sve prethodno navedene pojave obvezuju proizvođače da se fokusiraju na razvoj i usavršavanje proizvodnje same obloge elektrode. Svojstva zavarenog spoja mogu se poboljšati modifikacijom obloga s aditivima,

koji povećavaju stabilnost električnog luka ili smanjuju udio vodika. Elektrode s dvostrukom oblogom pokazale su dobre rezultate, posebno zbog visoke kvalitete prevlaka koje sprječavaju penetraciju vode i degradaciju obloge [1]. Elektrode za podvodno mokro zavarivanje u sebi sadrže aditive na bazi Ti, Ni ili Zr. Svojstva elektroda se čak razlikuju i kod primjene na različitim dubinama [12].

Vrste obloga prema [13]:

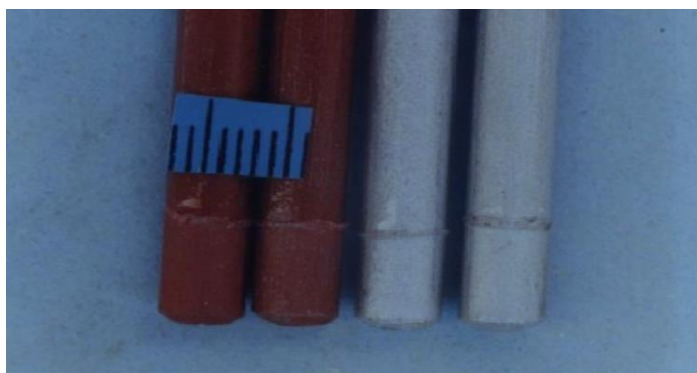
- kisele (A-acide)
- bazične (B-basic)
- celulozne (C-cellulosic)
- rutilne (R-rutile)
- oksidne (FeO, SiO₂).

Glavne funkcije obloga prema [14] jesu:

- omogućuje uspostavljanje i lako održavanje električnog luka
- taljenjem stvara zaštitnu plinsku atmosferu u području el. luka i taline, koja sprječava kontaminaciju zavarenog spoja vanjskom atmosferom, odnosno kisikom i vodikom nastalim disocijacijom vode
- osigurava nastanak troske koja štiti zavar i smanjuje u nekoj mjeri brzinu hlađenja
- sadrži aditive, odnosno legirne elemente koji osiguravaju potrebna mehanička svojstva zavarenog spoja
- štiti elektrodu od direktnog kontakta s vodom
- omogućuje lakše zavarivanje u prisilnim položajima.

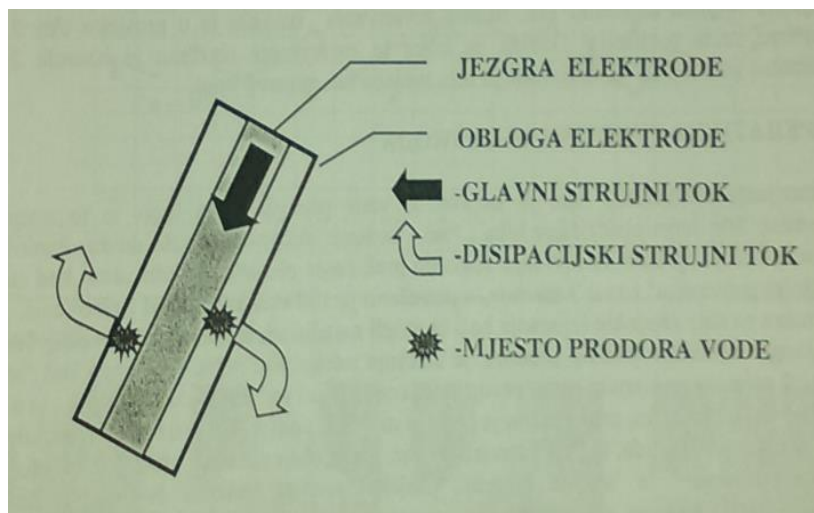
Od prethodno nabrojanih vrsta, kao najprikladnija se pokazuje rutilna elektroda sa dvostrukim premazom prikazana na slici 7. Ima najbolja operativna svojstva za primjenu, daje odličnu stabilnost električnog luka. Spojevi zadovoljavaju dobrim mehaničkim svojstvima, estetski su najprihvatljiviji, a troska se relativno lako otklanja. Prvi sloj premaza je električki provodljiv te osigurava lako uspostavljanje i održavanje električnog luka. Osim toga je u određenoj mjeri

nepromočiv te ima vrlo dobra mehanička svojstva. Drugi, vanjski sloj je električni izolator sa odličnim mehaničkim svojstvima i izvanrednom vodonepropusnošću. Prvenstvena zaštitna funkcija sekundarnog (vanjskog) sloja jest da omogućava uporabu ovakvih elektroda u kemijski agresivnim sredinama, te pri većim dubinama. Dodatne zalihe rutilnih elektroda moraju biti pohranjene na suhim mjestima temperature 15-30 C°. Ako je potrebno, proces sušenja odvija se pri maksimalnoj temperaturi od 80°C u trajanju od 1 sat. Treba napomenuti da obloga ipak ne može štititi elektrodu tijekom dužeg perioda pod vodom. Stoga se u pravilu ne uranja pod vodu više elektroda nego što se može iskoristiti u približno 30 minuta [14, 16].



Slika 7. Rutilne elektrode za mokro podvodno zavarivanje s dvostrukim vodonepropusnim premazom [11]

U daljnjim istraživanjima i analizama utvrđeno je da se vodonepropusni premaz elektrode različito ponaša u slanoj i slatkoj vodi. Budući da kvaliteta premaza posredno određuje nivo kvalitete zavarenog spoja, bitno je kako okolni medij djeluje na sam premaz. Morska voda koja, osim što stvara veliki energetski (strujni) gubitak, djeluje agresivno na premaz. Površina provara znatno je manja, što znači da dolazi do disipacije strujnoga toka prikazano na slici 8. Ta pojava također postoji u slatkoj vodi, ali u znatno manjoj mjeri jer morska voda ima značajniju električnu vodljivost. Posljedica disipacije toka može se uočiti na lošijoj kvaliteti zavora, odnosno manjoj površini provara i manjoj penetraciji. U praksi se stoga mora voditi račun o kompenzaciji parametara pri radu u morskoj vodi, tj. mora se povećati struja za 10-15 % [15].



Slika 8. Shematski prikaz disipacijskih strujnih tokova [15]

Prema [16] metalne jezgre elektrode mogu biti od:

- a) niskougljičnog čelika (C/Mn)
- b) niskolegiranog čelika
- c) austenitnog nehrđajućeg čelika
- d) elektrode na bazi nikla.

Elektrode s metalnom jezgrom od niskougljičnog mekog čelika (C/Mn) koriste se za opću uporabu i prikladne su za zavarivanje niskougljičnih čelika. Za zavarivanje čelika s višim udjelom ugljika ili legirnih elemenata u svom sastavu koriste se elektrode od austenitnog nehrđajućeg čelika te elektrode na bazi nikla. Zavareni spojevi dobiveni austenitnim nehrđajućim elektrodama i elektrodama na bazi nikla mogu u svom sastavu zadržati vodik, te se time smanjuje učestalost nastajanja hladnih pukotina u ZUT-u. Ipak, korištenjem austenitnih nehrđajućih elektroda na dobivenim zavarenim spojevima javlja se ravnomjerno raspoređen porozitet. Zavareni spojevi dobiveni takvim elektrodama imati će dobru vlačnu čvrstoću, no zbog razlike u toplinskoj ekspanziji između osnovnog metala (feritni) i elektrode (austenitna) nastali zavareni spojevi biti će podložni pucanju uslijed velikih zaostalih naprezanja. Kod elektroda na bazi nikla to nije slučaj. Iako zavareni spojevi dobiveni austenitnim nehrđajućim elektrodama imaju manju opasnost od nastajanja hladnih pukotina,

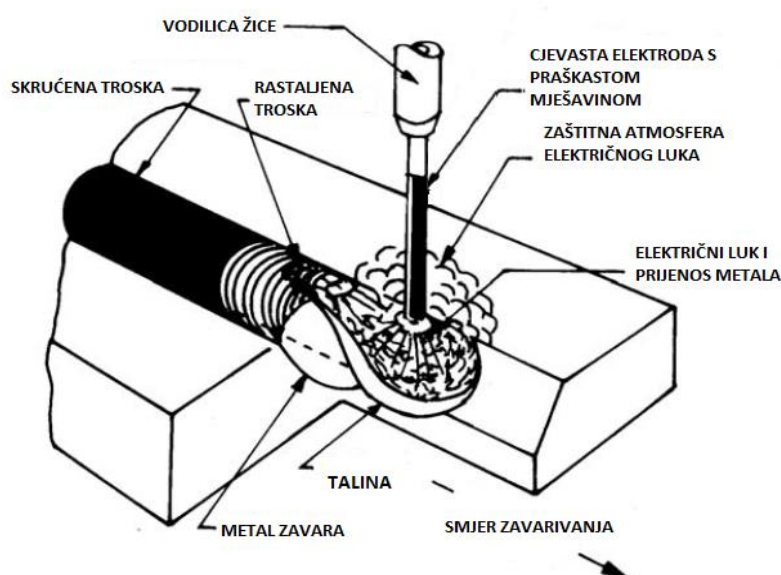
zbog pukotina u metalu zavara uz granicu ZUT-a njihova uporaba je ograničena. Korištenje elektroda na bazi nikla ograničeno je dubinom, te se pri dubinama većim od 10 m na zavarenim spojevima stvara visoki udio poroziteta. Naime, zbog nedovoljnog unosa topline, plinovi nastali izgaranjem elektrode ne stignu difundirati iz metala zavara. Daljnjim razvojem izvora energije i obloga elektroda, eksploatacija elektroda na bazi nikla mogla bi se povećati [16].

2.2.3. Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom

Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom (eng. FCAW-Fluxed cored arc welding) također je jedan od postupaka koji je pogodan za zavarivanje pod vodom. Karakterizira ga velik depozit, koji s nekim prednostima praška i jednostavnošću zavarivanja širi mogućnosti primjene mokrog podvodnog zavarivanja.

2.2.3.1. Fizičke osnove i karakteristike mokrog podvodnog FCAW postupka

Slično kao i kod MIG postupka, dobava žice je kontinuirana s kalema. Slika 9. prikazuje osnovni princip mokrog podvodnog FCAW-S zavarivanja. Postupak se klasificira kao poluautomatski. Žice za zavarivanje mogu biti samozaštićujuće punjene praškom ili žice štice zštićene zaštitnim plinom [17].



Slika 9. Shematski prikaz FCAW-S mokrog podvodnog zavarivanja [17]

Proces zavarivanja praškom punjenom žicom (eng. FCAW - *Flux cored arc welding*) koristi toplinu dobivenu električnim lukom za taljenje žice (dodatnog materijala) i radnog komada koji se zavaruje. Zaštitni plinovi i pare generirani su izgaranjem praška koji se nalazi u cjevastoj elektrodi, a može se koristiti i dodatna zaštita preko vanjsko dovedenog zaštitnog plina. Postupak je nastao kao zamjena za REL, jer je upotreba kontaktnih štapnih elektroda nespretna, a prevladani su i mnogi nedostaci koji se pojavljuju kod REL-a. Praškom punjena žica sastavljena je od metalne obloge i jezgre koja se sastoji od raznih materijala u prahu. Tijekom zavarivanja stvara se troska na zavarenom spoju. Prašak unutar žice štiti zavar od atmosfere i prebrzog hlađenja pomoću troske koja pokriva zavar [17].

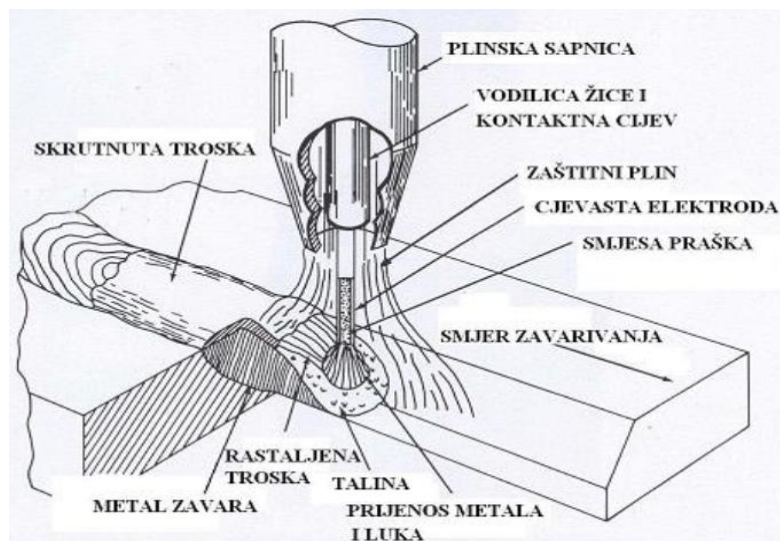
2.2.3.2. FCAW-S postupak mokrog podvodnog zavarivanja

Žica s praškastom jezgrom tali se toplinom električnog luka, pritom se stvaraju zaštitni plin i praškasti agensi koji omogućuju dobivanje kvalitetnog zavara bez vanjskog zaštitnog plina. Nakon završenog procesa zavarivanja sa zavara se uklanja nastala troska. Ovaj postupak prikazan na slici 9. obično se koristi za zavarivanje niskougljičnog čelika koji se koristi na otvorenom, budući da je moguće reparirati poljoprivrednu i građevinsku mehanizaciju u vrlo kratkom vremenskom periodu [17].

2.2.3.3. FCAW-G postupak mokrog podvodnog zavarivanja

Priprema spoja za FCAW-G postupak zavarivanja vrlo je slična pripremi spoja za REL postupak zavarivanja. Za osnovne konstrukcije sučeljenih spojeva treba razmotriti da konstrukcija spoja treba biti takva da stalni slobodni kraj žice bude iste duljine i kada se zavaruje po nekoliko prolaza u spoju. Drugi kriterij je da spoj u korijenu treba biti pristupačan i svaka dodatna operacija žicom tijekom zavarivanja treba biti omogućena [16].

Kutovi žljebova kod pripreme spoja raznih metala moraju biti propisno konstruirani kako bi omogućili pristup plinskoj sapnici pištolja i slobodnom kraju žice. Sapnica pištolja za automatsko zavarivanje omogućava lakši pristup uskim dijelovima spoja i omogućava manje kutove pri pripremi spoja. Uz pravilno izveden postupak zavarivanja mogu se postići kvalitetni zavari. Proces mokrog podvodnog zavarivanja FCAW-G postupkom prikazan je na slici 10 [16].



Slika 10. Shematski prikaz FCAW-G mokrog podvodnog zavarivanja [16]

2.2.4. Napredne tehnologije mokrog podvodnog zavarivanja

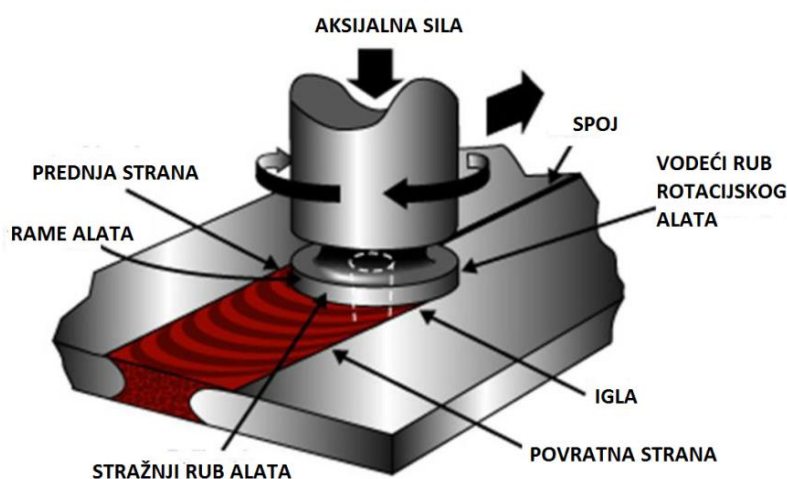
Osim elektrolučnih postupaka zavarivanja, dobro razvijen postupak je i podvodno zavarivanje trenjem (eng. FRW). Do sada je primjena podvodnog zavarivanja trenjem bila ograničena na primjenu u plitkim vodama kao što je anodno pričvršćivanje. Primjer primjene mokrog podvodnog zavarivanja trenjem je katastrofa podmornice Kursk na 106 m dubine. REL postupak nije osiguravao takvu kvalitetu zavara koja se zahtijevala. Neki od programa mokrog podvodnog zavarivanja trenjem koriste se u situacijama spašavanja na dubinama do 600 m [1].

Zavarivanje laserom također možemo uvrstiti pod izvedivi postupak mokrog podvodnog zavarivanja, makar se u praksi jako rijetko ili uopće ne koristi. Tradicionalne metode mokrog podvodnog zavarivanja u svom procesu uglavnom podrazumijevaju električni luk i zavarivača, ručnu ili automatiziranu zavarivačku opremu. Za razliku od njih ULBW postupak mokrog podvodnog zavarivanja ostvaruje metal zavara na površinama komponenata, s mogućnošću reparacije pukotina do 0,5 mm. Precizno kontrolirana toplina laserskog snopa i relativno niski unosi topline od 1 kJ/cm do 3 kJ/cm rezultiraju visokom kvalitetom zavarenog spoja te čistoćom depozita. Kao primjer primjene u praksi [18] ističe korištenje postupka u nuklearnim elektranama u Japanu, dok se u SAD-u premijerno koristio na nuklearnoj

elektrani *Robinson Nuclear plant* u Hartsvilleu. Cilj projekta bio je reparacija mlaznica s nesimetričnim zavarenim spojevima [17].

2.2.4.1. Mokro podvodno zavarivanje FSW postupkom-UFSW

Zavarivanje trenjem je proces zavarivanja u krutom stanju. Spada u postupke zavarivanja tlakom, to jest ne dolazi do taljenja materijala. Linija „taljenja“ i ZUT relativno su male u usporedbi s elektrolučnim postupcima zavarivanja [1]. U samom procesu prikazanim slikom 11. dolazi do sjedinjenja materijala pomoću generirane topline koja proizlazi iz smicanja, odnosno trenja površine rotirajućeg alata po površini radnog komada koji se drže skupa pod utjecajem tlaka. Gibanje se u većini slučajeva ostvaruje na način da jedan element istovremeno rotira i ostvaruje najčešće pravocrtno gibanje po površini drugog elementa, odnosno radnog komada. U trenutku ostvarivanja optimalne temperature dolazi do spajanja, odnosno ostvarivanja zavarenog spoja [19].



Slika 11. UFSW postupak mokrog podvodnog zavarivanja [19]

UFSW postupkom ostvaruju se visoko-kvalitetni, kao i visoko-čvrsti spojevi s malim deformacijama. Ovim postupkom podvodnog zavarivanja najčešće se ostvaruju sučeljeni i preklopni spojevi. Spektar materijala i dimenzije zavarenog spoja koje se mogu ostvariti su široki. Rotacijski alat kojim se ostvaruju spojevi, otporan je na trošenje i visoke temperature. U trenutku dovoljnog iznosa generirane topline, materijal koji se zavaruje prelazi u plastično stanje, utiskuje se u cijelom području rotirajućeg alata i postepeno dolazi do formiranja zavarenog spoja. Kod UFSW postupka zavarivanja zona utjecaja topline i područje oko nje

nisu izloženi visokim temperaturama zbog utjecaja vode kao okolnog medija i činjenice da se postupak ne temelji na taljenju materijala. Istraživanja prema [26] su pokazala da su svojstva zavarenog spoja čak bolja kada su ostvarena pod vodom, nego na suhom. Mikrostruktura spojeva je finija, spriječen je rast zrna zbog ograničene rekristalizacije zrna [26].

Postoje 3 parametra koja su bitna za ostvarivanje kvalitetnoga zavara [17]:

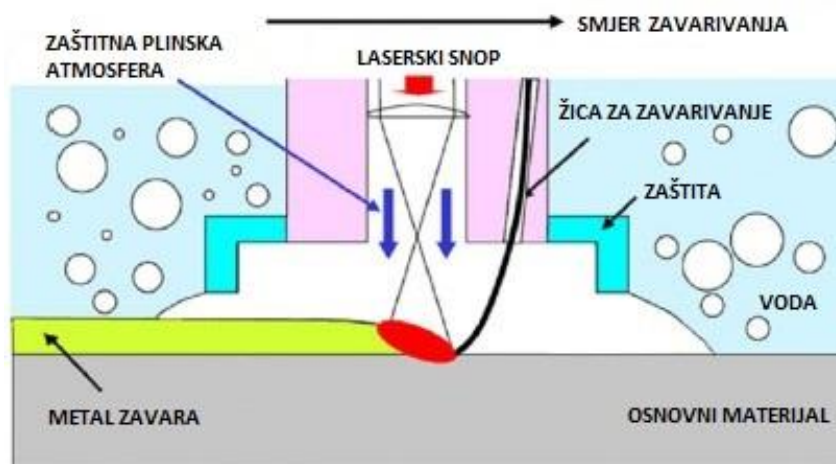
- brzina rotacije alata koja
- iznos tlaka između alata i radnog komada
- period trajanja procesa zavarivanja.

Neke osnovne karakteristike zavarenog spoja prema [1]:

- čvrstoća spoja viša, a ZUT manji u usporedbi sa postupcima zavarivanja na suhom
- neprisutnost uključaka i poroznosti
- postupak osjetljiv na ekvivalent ugljika, jer povećanje CE rezultira povećanjem tvrdoće.

2.2.4.2. *Mokro podvodno lasersko zavarivanje-ULBW*

Laser je izvor koherentne i monokromatske radijacije, ima širok spektar primjene i predstavlja bitnu ulogu u grani zavarivanja. Na slici 12. prikazan je proces mokrog podvodnog zavarivanja laserom uz žicu kao dodatni materijal. Funkcija fokusiranog laserskog snopa je ozračivanje radnog komada, odnosno spoja određenom brzinom i intenzitetom. Plinska zaštitna atmosfera (argon), štiti talinu od oksidacije, odvodi toplinu, sprječava kontakt vode s laserskim snopom i osigurava dovoljan protok kisika. Posljedica grijanja laserom je spajanje radnih komada u trenutku povlačenja laserskog snopa. U slučaju zavarivanja s dodatnom žicom, taljenje je prisutno pri vrhu dodavane žice, odnosno dio osnovnog materijala koji je zračen laserom se tali zajedno sa žicom i time se osigurava glatki zavareni spoj. Kod zavarivanja laserom poželjno je da putuje radni komad, a ne snop i to brzinom pogodnom za kvalitetno zavarivanje i održavanje minimalnog ZUT-a. Relativna pozicija fokusa laserskog snopa utječe na kvaliteti i mehanička svojstva zavara [17].



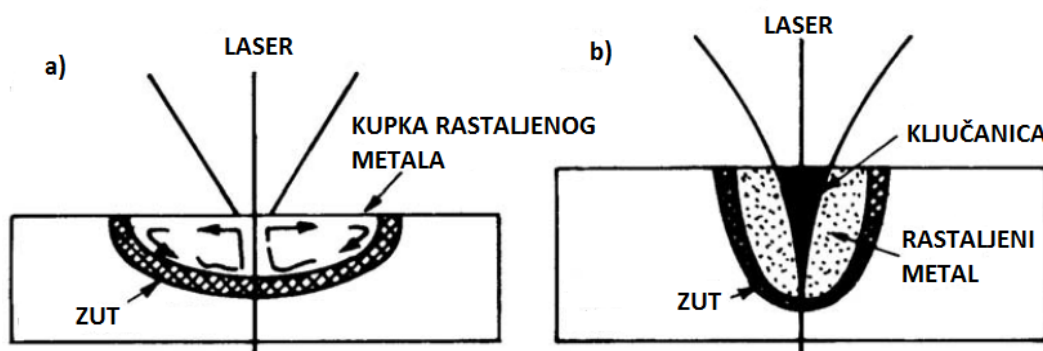
Slika 12. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja laserom s dodatnom žicom [18]

Kod laserskog zavarivanja postoje dva moguća procesa prikazana slikom 13. koja ovise o odnosu snage, odnosno konfiguracije laserskog snopa i njegovog fokusa [17]:

- a) kondukcijsko zavarivanje
- b) zavarivanje na principu tzv. ključanice ili duboko penetracijsko zavarivanje.

Kondukcijsko zavarivanje karakterizira laserski snop koji je van fokusa, gustoća snage je niža u usporedbi sa zavarivanjem na principu ključanice i ne može se postići taljenje na zadanoj brzini zavarivanja [17].

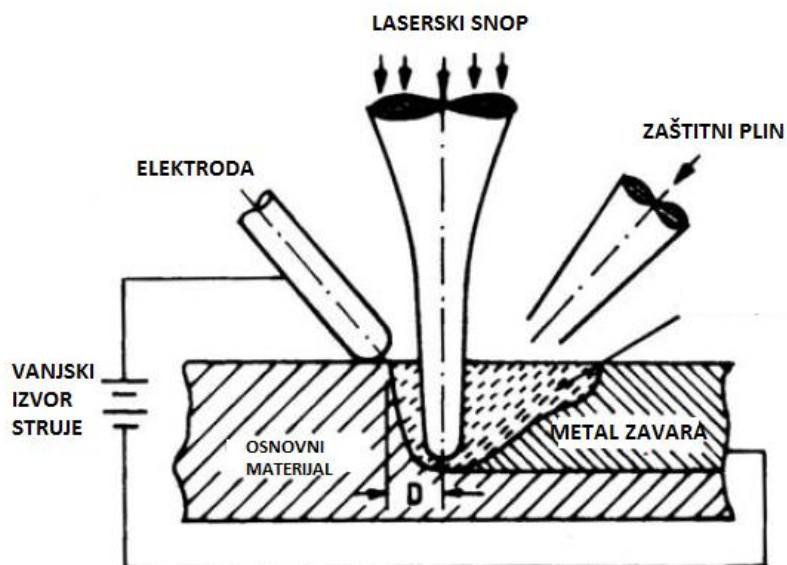
Kod zavarivanja ključanicom iznos energije je dovoljan za isparavanje te dolazi do pojave rupe u talini. Ponašanje taline možemo usporediti s ponašanjem optičkog crnog tijela jer u trenutku pojave radijacije u nastaloj rupi, dolazi do njenog razmnoženog reflektiranja. Prijelazno područje između kondukcijskog i duboko penetracijskog zavarivanja javlja se povećanjem intenziteta lasera i trajanja impulsa lasera primijenjenog na radni komad [17].



Slika 13. Shematski prikaz a) kondukcijski rastaljenog metala b) duboko penetracijsko lasersko zavarivanje [17]

Kern, Xiao i suradnici [17] došli su do još nekih zanimljivih zaključaka u domeni mokrog podvodnog laserskog zavarivanja. Naime, definirano je da u rastaljenom metalu teče unutarnja struja pogonjena termoelektričnim potencijalom. Primjenjujući vanjsko magnetsko polje, demonstriran je presjek zavora, smanjene su pore u zavoru i dobivena je mogućnost primjene većih struja za zavarivanje čelika.

Sljedeća modifikacija koju je Xiao primijenio je dobava struje s posebnog vanjskog izvora energije tokom laserskog zavarivanja. Vanjski izvor struje je dodan talini metala preko TIG elektrode promjera 2,4 mm prikazano slikom 14. Električna struja koja teče talinom inducira azimutni magnetski tok koji je proporcionalan gustoći struje te iz toga nastaju elektromagnetske sile proporcionalne kvadratu gustoće struje. Posljedice vanjskog izvora struje prikazuju se većom ključanicom, drugim riječima penetracija je manja, dok je širina raste. Zaključno, vanjski izvor struje znatno utječe na protok rastaljenog metala u talini, oblik presjeka zavora, pogotovo kod zavarivanja aluminija, što za posljedicu ima povećanje fleksibilnosti procesa [17].



Slika 14. Shema eksperimentalnog postupka mokrog podvodnog laserskog zavarivanja [17]

Zaključno, mokro podvodno lasersko zavarivanje se u usporedbi s ostalim podvodnim postupcima karakterizira niskim unosom topline, jednostavnim prijenosom energije i dobrom kontrolom procesa. Nizak unos topline rezultira značajnim smanjivanjem pojave pukotina uzrokovane napetosnom korozijom (eng. SCC). No ipak, ULBW se još uvijek ne koristi u praksi ili se koristi rijetko, npr. u nekim naprednim sustavima. Razlog tome su serije problema poput prijenosa laserskog snopa do radnog komada u vodi, isključivanja vode iz samog procesa zavarivanja te njezinoga utjecaja na svojstva repariranog spoja i slično [17].

2.2.5. Problemi kod mokrog podvodnog zavarivanja

Električni luk pod vodom tali metal isto tako intenzivno kao i na zraku, bez obzira na intenzivno odvođenje topline uzrokovano fizičkim svojstvima sredine koja ga okružuje. Vodik koji nastaje toplinskom disocijacijom vode, čini veći udio u plinu koji nastaje prilikom mokrog podvodnog zavarivanja. Kisik, koji se oslobađa pri istom procesu, sudjeluje u izgaranju materijala elektrode. Pare metala i komponente obloge, reagirajući s vodom, kondenziraju u sitne čestice, koje se pretežito sastoje od oksida željeza, a u vodi čine koloidnu otopinu sivo-crne boje, koji se ne taloži.

Disocijacija vode pri mokrom podvodnom zavarivanju odvija se prema reakciji (1) porastom parcijalnog tlaka vodika i kisika u električnom luku [6]:



Izgaranjem obloge elektrode nastaje ugljik koji s kisikom stvara ugljični dioksid koji disocira prema reakciji (2) [6]:

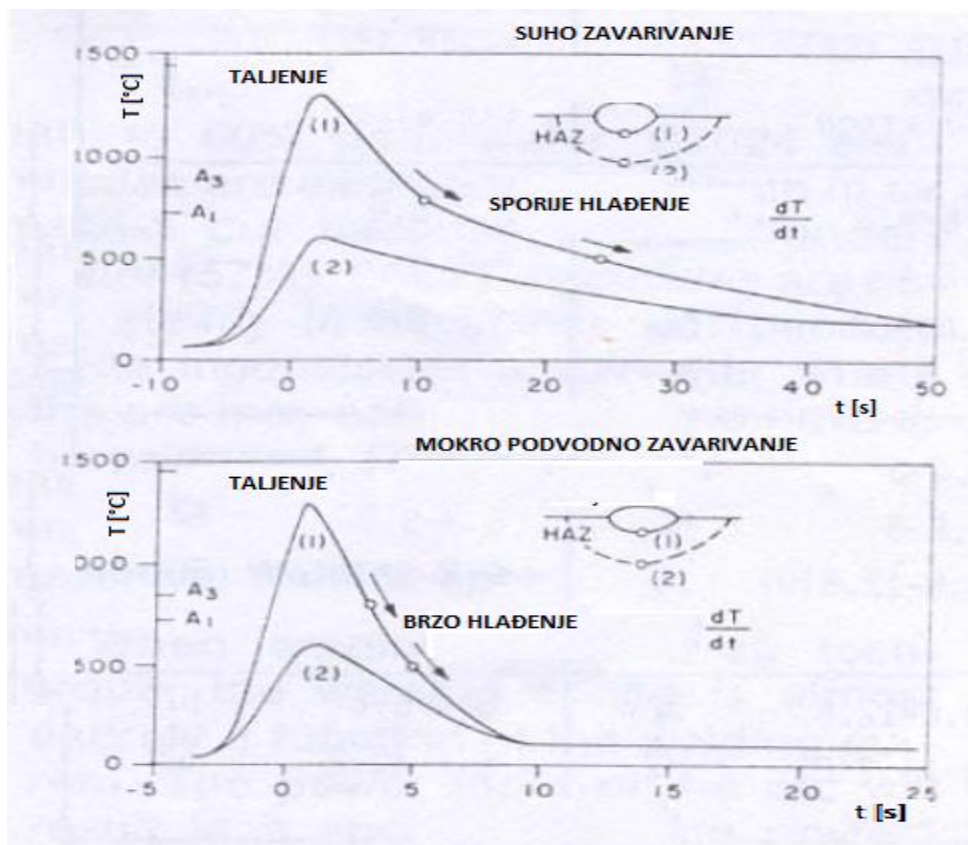


Uz prethodno objašnjene reakcije (1) i (2), isparavanjem i disocijacijom vode te sagorijevanjem obloge dolazi do stvaranja plinova sljedećih sastava [6]:

- 62-82 % H_2 (vodik)
- 11-24 % CO (ugljični monoksid)
- 4-6 % CO_2 (ugljični dioksid)
- O_2 (kisik)
- N_2 (dušik).

Sastav nastalih plinova ostaje uglavnom isti, bez razlike radi li se o slatkoj ili slanoj vodi. Ispitivanje sastava plina u porama pokazao je da se u porama nalazi između 96-99% vodika, a ostatak je ugljični monoksid. Modeli stvaranja pora pokazali su da se kritičan radijus za stvaranje pore smanjuje s povećanjem tlaka. Pri mokrom podvodnom zavarivanju moguće je regulirati samo dva parametra koji utječu na pojavu pora, a to su brzina hlađenja i koncentracija vodika. Za postizanje najboljih rezultata u smislu produljivanja vremena skrućivanja i smanjenja koncentracije vodika preporuča se guranje taline elektrodom tehnikom transversalnog njihanja ili djelovanjem vanjskog magnetskog polja [6].

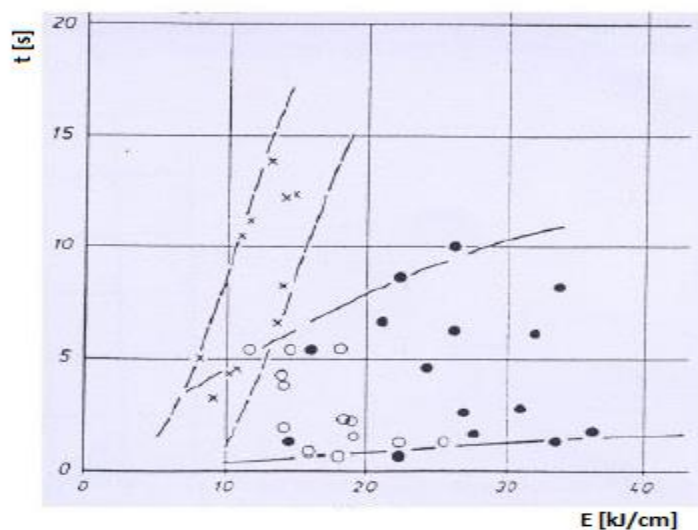
Zbog naglog hlađenja prikazanog na slici 15 za čelik X70, koje je četiri do pet puta brže nego pri zavarivanju na suhom dolazi do nastanka zavarenih spojeva s povišenom tvrdoćom. Brzo hlađenje taline rezultat je visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode te velike razlike u temperaturi između vode i taline. Zavareni spojevi dobiveni mokrim podvodnim zavarivanjem uslijed naglog hlađenja imaju određeni udio martenzita u svojoj mikrostrukturi što uzrokuje visoku tvrdoću, a nisku udarnu radnju loma i čvrstoću. Zbog krhke i zakaljane strukture nastali zavareni spojevi podložni su pucanju. Tvrdoća u području zone utjecaja topline može doseći vrijednosti iznad 350 HV10.



Slika 15. Usporedba brzina hlađenja pri suhom zavarivanju (gornji dijagram) i mokrom podvodnom zavarivanju (donji dijagram) [6]

Negativne posljedice direktnog pristupa vode mjestu zavarivanja izravno su vezane uz prethodno objašnjeno brzo hlađenje i visok udio difundiranog vodika koji se kreće u granicama 30-80 ml u 100g zavara. Zbog brzog hlađenja dolazi do stvaranja lokalno zakaljene strukture visoke tvrdoće, a to se posebno očituje u zoni utjecaja topline. Difundirani vodik čini strukturu spoja osjetljivom na pojavu vodikove krhkosti. Drugim riječima dolazi do pojave pukotina uzrokovane vodikom. Negativan utjecaj ovih faktora može se prikazati i pojavom mikropora, koje nastaju zbog brze solidifikacije i nemogućnosti otplinjavanja metala zavara. Neka istraživanja pokazala su i da primjena katodne zaštite utječe na povećanja sadržanog vodika koji difundira u rešetku materijala.

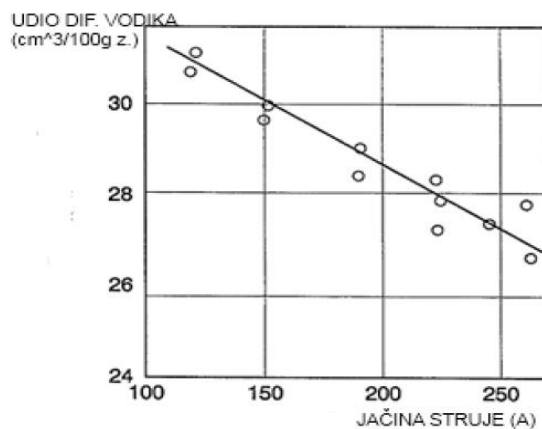
Vrijeme hlađenja taline između $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{8/5}$) prikazano na slici 16., zavisno o parametrima zavarivanja i uvjetima okoline, iznosi između 2-4 sekunde, dok kod zavarivanja na suhom vremensko trajanje hlađenja u tom temperaturnom području iznosi oko 16 sekundi [16].



Slika 16. Dijagram ovisnosti $t_{8/5}$ o unosu topline za zavarivanje u normalnim uvjetima i pri mokrom podvodnom zavarivanju obloženom elektrodom; osnovni materijal St 37-2, debljina 20mm; mokro podvodno zavarivanje ○- rutilno-celulozna obloga, ● rutilna obloga; x-zavarivanje u normalnim uvjetima, rutilna obloga [11]

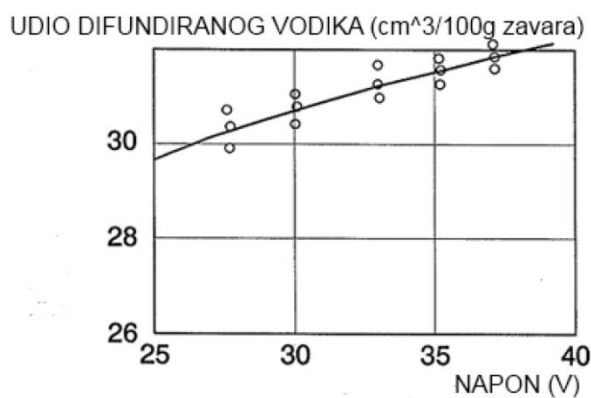
2.2.6. Utjecaj parametara mokrog podvodnog REL zavarivanja na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju

Istraživanjima se pokazalo da različite vrijednosti parametara zavarivanja utječu na udio difundiranog vodika u metalu zavara. Na slici 17. prikazan je utjecaj jačine struje na topljivost vodika u metalu zavara REL postupkom mokrog podvodnog zavarivanja [16].



Slika 17. Utjecaj jačine struje na topljivost vodika u metalu zavara [16]

Iz grafa se jasno uočava da porastom jačine struje, udio otopljenog vodika u metalu zavara pada. U slučaju napona situacija je obrnuta, odnosno porastom napona raste i udio otopljenog vodika u metalu zavara prikazano slikom 18 [16].



Slika 18. Utjecaj napona na topljivost vodika u metalu zavara [16]

Zaključno, mokro podvodno zavarivanje jakom strujom, niskim naponom i negativnim polaritetom, odnosno većim unosom topline daje minimalni udio vodika u zavarenom spoju [16].

3. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH MARTENZITNIH ČELIKA

Postoji više definicija zavarljivosti, a najčešće se koristi definicija koju je dao Međunarodni institut za zavarivanje koja je i usvojena od Međunarodne organizacije za standardizaciju ISO:

"Metalni materijal smatra se zavarljivim u određenom stupnju, utvrđenim postupkom zavarivanja i za određenu primjenu, ako se kontinuitet materijala ostvaruje zavarenim spojem izvedenim pod uvjetima predviđenim za ostvarivanje tog stupnja zavarljivosti. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na konstrukciju koje je sastavni dio [13]."

3.1. Općenito o martenzitnim čelicima

Martenzitni nehrđajući čelici spadaju u skupinu čelika kojima je maseni udio kroma između 12 % i 18 %, udio ugljika od 0,15 % do 1,2 % te mogu sadržavati i do 1,3 % molibdena i 2,5 % nikla. Glavni element koji utječe na svojstva ove grupe čelika je ugljik. Što je udio ugljika u njima manji, oni pokazuju veću udarnu radnju loma i otpornost na pukotine [20].

Takvi čelici moraju posjedovati sposobnost strukturnih pretvorbi iz neke početne ne austenitne strukture u austenit te zatim u martenzit, jer se martenzitna mikrostruktura ovih čelika postiže alotropskom transformacijom austenita. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost ove skupine čelika postiže se propisanom toplinskom obradom, kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem [21].

Martenzitne nehrđajuće čelike moguće je podijeliti u dvije skupine [20]:

- konstrukcijski (do 0,25 % C)
- alatni (>0,3 % C, nakon kaljenja nisko se popuštaju).

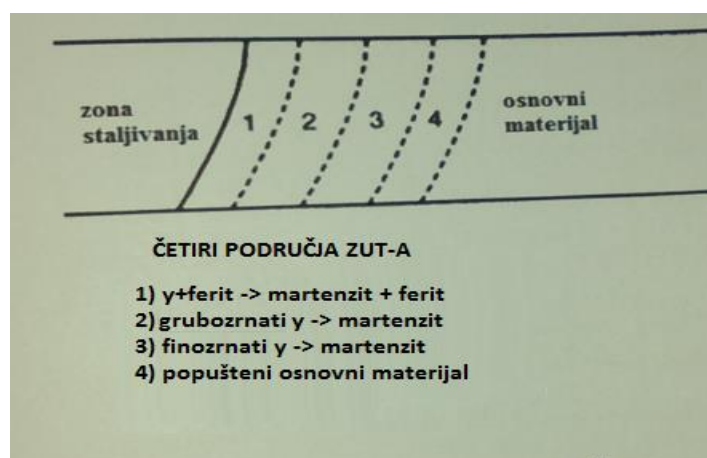
Martenzitni nehrđajući čelici imaju širok raspon vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja. Raspon granice razvlačenja je od 275 MPa u žarenom stanju, do 1900 MPa u gašenom i popuštenom stanju. Popuštanje čelika potrebno je provesti kako bi se dobila prihvatljiva žilavost i duktilnost za većinu inženjerskih namjena. Valja napomenuti kako je ipak glavno

svojstvo ove skupine čelika visoka tvrdoća što je temelj za dobru otpornost na abrazijsko trošenje. Martenzitni čelici nisu toliko dobro korozijski postojani kao ostali nehrđajući čelici. Razlog tome je viši sadržaj ugljika i niži sadržaj kroma nego kod drugih čelika. Iz tog razloga ova vrsta čelika primjenjuje se u aplikacijama gdje je potrebna visoka čvrstoća i tvrdoća materijala, dok korozijska postojanost nije toliko bitna [21].

Martenzitni čelici imaju najlošiju zavarljivost od svih nehrđajućih čelika zbog pojave nepopuštenog martenzita za vrijeme hlađenja nakon zavarivanja. Slično kao i kod ostalih konstrukcijskih čelika potrebno je poduzeti posebne mjere opreza pri zavarivanju ovih čelika, posebno onih s više od 0,1 % C [21].

3.2. Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika i njihova mikrostruktura

Zbog formiranja nepopuštenog martenzita tijekom hlađenja nakon zavarivanja, martenzitne legure smatraju se najslabije zavarljivim od svih vrsta nehrđajućih čelika. Prilikom zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika, zona taljenja i dio ZUT-a koji su zagrijavani na temperaturu višu od temperature austenitizacije za zadani čelik, nakon hlađenja postižu temperature kod kojih materijal poprima krhku martenzitnu strukturu. S obzirom da je takva mikrostruktura lošije duktilnosti od okolne mikrostrukture, u teoriji ovakav se čelik ne može koristiti odmah nakon zavarivanja, već se mora provesti toplinska obrada kako bi se postigla povoljnija mehanička svojstva. No, u praksi kod mokrog podvodnog zavarivanja takva rješenja su nemoguća ili zahtijevaju sofisticiranu opremu. Na slici 19. prikazana su četiri različita područja zone utjecaja topline te pripadajuće faze za svaku zonu [22].



Slika 19. Prikaz četiri zone ZUT-a prilikom zavarivanja martenzitnog čelika [22]

Područje 1 nalazi se uz zonu staljivanja, sastoji se od dviju faza, martenzita i ferita. Do pojave ferita uz liniju staljivanja dolazi jer se to područje zavarivanjem zagrijalo na temperaturu austenitnog i feritnog faznog područja.

U području 2 ZUT je zagrijan do visokotemperaturne austenitne faze, karbidi iz legure osnovnog materijala potpuno se otapaju, te iz gruboznatog austenita nastaje martenzit.

Područje 3 sastoji se od nepopuštenog martenzita i mjestimično od neotopljenih karbida. Karbidi se nisu potpuno otopili jer je to područje ZUT-a zagrijano na nešto niže temperaturne austenitne faze.

Područje 4 karakterizira struktura materijala koja je gotovo identična osnovnom materijalu, a sastoji se od popuštenog martenzita i karbida [22].

Martenzitni čelici koji sadrže do 0,06 % C, s tvrdoćom do 36 HRC posjeduju dobru zavarljivost. Zavarivanje ovih čelika slično je kao i kod zavarivanja niskolegiranih visokočvrstih čelika [22].

3.3. Mekomartenzitni čelici

Martenzitni čelik X3CrNiMo13-4 spada u skupinu mekomartenzitnih čelika. To je skupina ultračvrstih čelika. Karakterizira ih korozijska postojanost, povišena prokaljivost do najvećih presjeka te otpornost na popuštanje sa svrhom primjenjivosti na radu pri visokim temperaturama. Osnovna ideja razvoja ovih čelika je smanjenje sadržaja ugljika te uz to zadržavanje martenzitne strukture. Samim sniženjem ugljika snizile bi se i čvrstoća i granica razvlačenja, pa se to treba kompenzirati dodavanjem odgovarajućih legiranih elemenata, 13 % do 18 % Cr, 1 % do 6 % Ni i < 3 % Mo, koji neće negativno utjecati na ostala svojstva kao što je npr. zavarljivost. Legiranje niklom kompenzacija je za niski sadržaj ugljika. Nikal kao gamageni legirani element širi područje austenita u faznom dijagramu čime se omogućava fazna transformacija u martenzit. Molibden se dodaje radi poboljšanja korozijske postojanosti, a titan zbog stabilizacije mikrostrukture formiranjem titanovih karbida (TiC) te povoljnog utjecaja na veličinu kristalnih zrna. Ova podskupina čelika, mekomartenzitni čelici, s realno 0,03 % do 0,05 % C postiže svoja fizička, mehanička i kemijska svojstva austenitizacijom, gašenjem i popuštanjem pri 450 °C do 700 °C. Odabirom takve temperature ostvaruje se ili maksimalna tvrdoća (čvrstoća) ili maksimalna udarna radnja loma [23].

Procjenjuje se kako su mekomartenzitni čelici primjenjivi u temperaturnom rasponu – 100 °C do 300 °C. Pri duljem radu na temperaturama od 550 °C došlo bi do pojave austenita što se ne smije dopustiti zbog snižavanja svojstava čelika.

Mekomartenzitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka (iznimno djelovanju morske vode), izradu lopatica turbina, valjaka u proizvodnji papira, izradu dijelova pumpi poput rotora, osovina, lopatica, kliznih ploha, pa je za ovu vrstu čelika izuzetno bitno poznavati tehnologiju mokrog podvodnog zavarivanja [23].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Svrha eksperimentalnog dijela ovog rada je ispitivanje utjecaja unosa topline na mehanička svojstva martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4 pri mokrom podvodnom zavarivanju REL postupkom. Potrebno je odrediti parametre zavarivanja, te navesti razlike u procesima zavarivanja kutnog spoja s različitim promjerima elektroda, kao i njihov utjecaj na tvrdoću u zoni utjecaja topline. Zaključno tome, potrebno je provesti analizu dobivenih rezultata i donijeti preporuke za mokro podvodno zavarivanje martenzitnih čelika u realnim uvjetima.

4.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio diplomskog rada u potpunosti je izveden u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Eksperiment se sastojao od izrezivanja ploča zračnom plazmom, izrade uzoraka strojnom obradom, zavarivanja pripoja MAG postupkom, mokrog podvodnog zavarivanja kutnog spoja s dvije elektrode različitih promjera, ispitivanja penetrantima, ponovnog rezanja uzorka zračnom plazmom, hladnog rezanja makroizbruska tračnom pilom, finog brušenja, kemijske obrade makroizbruska i završnog ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja na tvrdomjeru. Postupak mokrog podvodnog zavarivanja izvodio se u bazenu zapremnine 500 litara, dimenzija 1100 mm x 600 mm x 750 mm prikazan na slici 20. Zavarivanje je provedeno u slatkoj vodi iz gradskog vodovoda, na dubini od 250 mm, uz temperaturu vode od 22 °C do 27 °C i temperaturu zraka od 22 °C do 30 °C. Za REL postupak predpokusom su optimizirani parametri koji su dali prihvatljivi unos topline. Tijekom procesa zavarivanja parametri su konstantno kontrolirani, posebno jakost struje strujnim kliještama.



Slika 20. Bazen za podvodno zavarivanje

Za analizu utjecaja različitih unosa topline različitim promjerima elektroda na tvrdoću u ZUT-u korištena je metoda mjerenja tvrdoće po Vickersu.

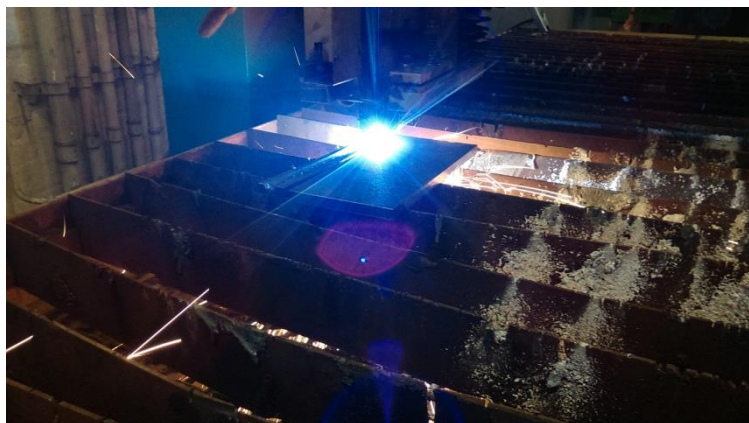
4.1.1. Priprema uzorka

Uzorci namijenjeni za podvodno zavarivanje izrađeni su iz ploča čelika X3CrNiMo13-4 debljine 10 mm. Prema proizvođaču koji garantira pouzdanost podataka kemijski sastav čelika X3CrNiMo13-4 prikazan je tablicom 1.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X3CrNiMo13-4 [24]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni
Maseni udio, %	0,05	0,7	1,5	0,04	0,02	$\geq 0,02$	12,0- 14,0	0,3-0,70	3,5-4,5

Prva faza izrade uzoraka, prikazana na slici 21., bila je izrezivanje uzoraka zračnom plazmom na određene dimenzije potrebne za izvođenje kutnog zavarenog spoja. Obje ploče su sa svake strane već prethodno bile strojno obrađene.



Slika 21. Rezanje ploča zračnom plazmom.

Prije podvodnog zavarivanja bilo je potrebno zavariti pripoje koji sprječavaju pomicanje ploča tijekom podvodnog zavarivanja. Pripoji su izrađeni MAG postupkom zavarivanja u suhim uvjetima. U postupku prikazano na slici 22. korištena je plinska mješavina 82 % Ar i 18 % CO₂.



Slika 22. Zavarivanje pripoja MAG postupkom

4.1.2. Mokro podvodno REL zavarivanje

Postupak mokrog podvodnog REL zavarivanja proveden je u bazenu opisanih karakteristika u poglavlju 4.1. U ovom eksperimentu izrađen je jedan kutni spoj. Svaka strana zavara izvedena je različitim promjerima elektroda, odnosno različitim unosima topline. Prije ispitnog zavarivanja bilo je potrebno predpokusom na probnom uzorku pronaći odgovarajuće parametre mokrog podvodnog zavarivanja REL postupkom. U procesu zavarivanja koristile su se elektrode proizvođača Lastek promjera 3,2 mm te 4,0 mm. Ove vrste elektroda namijenjena su za podvodno zavarivanje čelika povišene i visoke čvrstoće. Obloga im je rutilna s aditivima željeznog praha i nikla. Obloga elektrode prevučena je polimernim vodonepropusnim slojem koji održava stabilnost obloge i sprječava prodor vode, a ujedno je i izolator čime se povećava sigurnost ronilaca i stabilnost električnog luka. Po preporukama primijenjena je istosmjerna struja tako da je elektroda spojena na negativni pol. Kemijski sastav i mehanička svojstva elektroda prikazani su u tablicama 2. i 3.

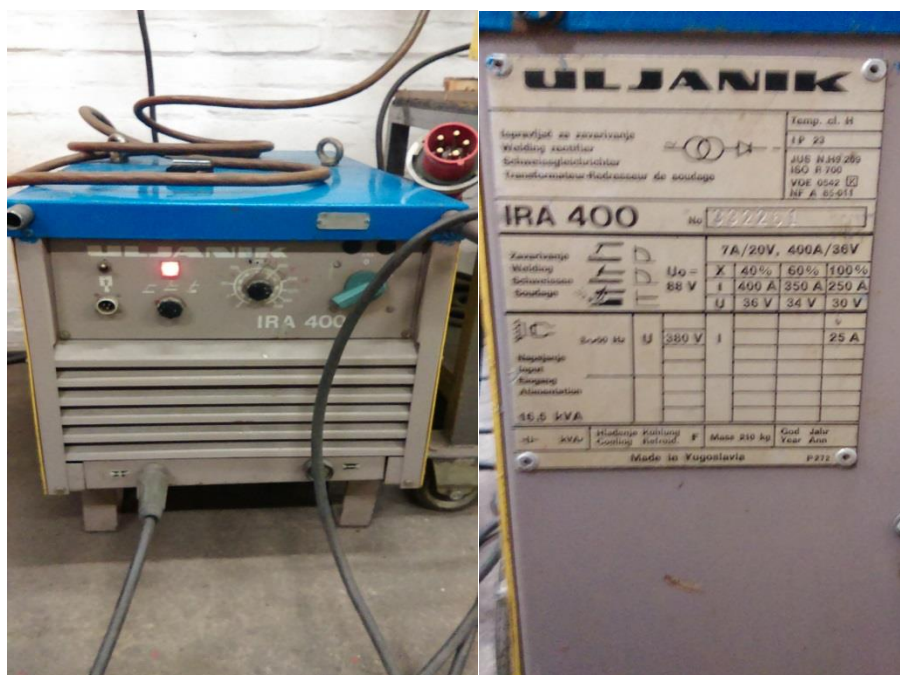
Tablica 2. Kemijski sastav metala zavara elektrode Lastek 1008 [6]

Kemijski element	C	Mn	Si	S	O	Ni
Maseni udio, %	0,05	0,5	0,45	0,025	0,025	0,3

Tablica 3. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [6]

Uvjeti zavarivanja	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Istezljivost A , %	Kontrakcija Z , %	Udarne radnja loma K_u
Suho zavarivanje	540	26	70	62 J pri 0 °C
Mokro zavarivanje	564	12 - 13,5	47	50 - 54 J pri -20 °C

Izvor struje ULJANIK IRA 400 korišten za mokro podvodno zavarivanje zajedno sa svojim karakteristikama prikazan je na slici 23. Generalno, karakteristike izvora struje za mokro podvodno zavarivanje iste su kao i kod izvora za suho REL zavarivanje. Jedina bitna razlika je ta da je kod izvora za mokro podvodno zavarivanje napon praznoga hoda U_0 u iznosu od 40 V dok je kod izvora za suho REL zavarivanje oko 80 V. Razlog tome su sigurnosni razlozi kod zavarivanja pod vodom. Posljedica nižeg napona praznoga hoda je teža uspostava električnog luka.



Slika 23. Izvor struje za zavarivanje i njegove karakteristike

Tablica 4. Parametri zavarivanja

Stanje pokusa	Vrsta struje i polaritet	Struja, A	Promjer elektrode, mm	Nagib elektrode, °
1	DC,-	180	3,2	70 - 80
2	DC,-	250	4,0	70 - 80

Zbog pojave disipacije u vodi, specifična unesena toplota po duljinskoj mjeri je smanjena, a koeficijent iskoristivosti električnog luka pri REL mokrom podvodnom zavarivanju je $\eta_{REL}=0,8$. Iznos jakosti struje kontroliran je strujnim kliještima i zaključeno je da jakost struje ne odstupa od vrijednosti podešene na samome uređaju. Unos topline računa se prema izrazu (3) iz norme HRN EN 1011-1:

$$q = \frac{U \times I \times \eta_{REL}}{v_{ZAV}}, \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (3)$$

pri čemu su:

q – unos topline [J/mm]

v_{ZAV} – brzina zavarivanja, mm/s

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

η_{REL} – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja.

Kod izvođenja mokrog podvodnog zavarivanja kutnog spoja, od parametara jedino je jakost struje bila provjeravana. Razlog tome je taj, što se kod REL postupka zavarivanja kao parametar određuje jedino jakost struje. Cilj ovog eksperimenta ne zahtijeva detaljne vrijednosti iznosa napona zavarivanja koji utječe npr. na udio difundiranog vodika u metalu zavara, a koji direktno ovisi o visini električnog luka koji određuje zavarivač svojom tehnikom rada. Za ovaj eksperiment to nije predmet analize. Brzina zavarivanja kao parametar bitna je u smislu da su se oba prolaza sa svake strane obavila približno istom vrijednošću. Zaključno tome, najbitnija činjenica na temelju ovih podataka je da se unosi topline razlikuju kod izvođenja prvog i drugog stupnja pokusa. Kod zavarivanja jedne strane kutnog spoja elektrodom 1, promjera 3,2 mm, unos topline je manji nego kod primjene elektrode 2, promjera 4,0 mm. To je najbitniji podatak koji će kasnije biti iskorišten kod analize rezultata mjerenja tvrdoće u ZUT-u.

Na slici 24. prikazana je priprema kutnoga spoja s priključenim uzemljenjem. Vidljivo je kako je voda trenutno čista, što neće biti slučaj nakon obavljenog zavarivanja. Prije izvođenja

postupka, potrebno je mehaničko čišćenje ploča koje osigurava kvalitetnije uvjete mokrog podvodnog zavarivanja.



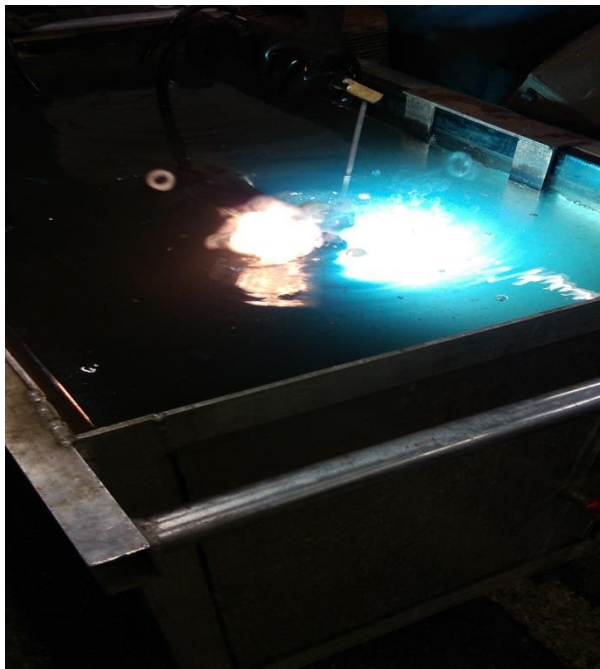
Slika 24. Kutni spoj pripremljen za zavarivanje

Prije uspostave električnog luka, potrebno je držač elektrode pozicionirati u pravilan položaj prikazan na slici 25.



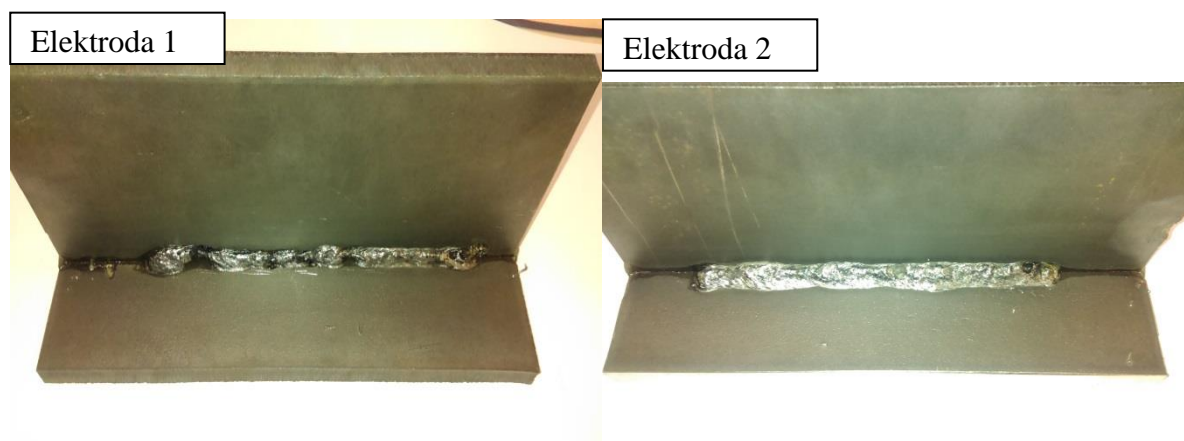
Slika 25. Pozicioniranje držača elektrode za početak zavarivanja kutnog spoja

Slika 26. prikazuje proces mokrog podvodnog zavarivanja. Karakteristika procesa je da tijekom izvođenja procesa nastaju plinski mjehurići koji izlaze na površinu, a te iste mjehuriće zamjenjuju novi u području električnog luka.



Slika 26. Mokro podvodno REL zavarivanje kutnog spoja

Izgled zavarenih spojeva prikazan je na slici 27. Vidljivo je da se zavari razlikuju, posebno u pogledu količine metala zavora, kao i samim estetskim izgledom, što podrazumijeva pore, pukotine i sl.



Slika 27. Dobiveni zavareni kutni spoj

4.1.3. Ispitivanje uzorka penetrantima

Nakon procesa podvodnog mokrog zavarivanja, slijedilo je ispitivanje penetrantima. Metoda se koristi s ciljem uočavanja bilo kakvih površinskih nepravilnosti kao što su pore, pukotine i sl. Kod postupka ispitivanja penetrantima prvo se koristi sredstvo za odmašćivanje isptine površine ELITE BC1, u ovom slučaju dvije površine metala zavara. Zatim se nanosi sredstvo ELITE K71B2p, odnosno penetrant crvene boje koji pomoću kapilarnog efekta penetrira u sve pukotine i pore otvorene prema površini. Nakon tog perioda ispitna površina, odnosno zavareni spojevi isprani su vodom. Nakon pranja i sušenja, na ispitnu površinu nanesen je razvijač ELITE D112A koji je ostavljen 15 minuta u mirovanju. Nakon razvijanja provedena je vizualna kontrola.

Na uzorku su uočene indikacije na početku procesa zavarivanja gdje je bilo otežano uspostavljanje električnog luka, odnosno kada su se javljale nestabilnosti procesa električnog luka. Izdužene indikacije uočene su i uzduž zavara. Kasnijom vizualnom kontrolom utvrđeno je da otkrivene indikacije predstavljaju pukotine na početku i kraju zavara te uzdužne pukotine u ZUT-u. Ispitivanje je pokazalo da je na elektrodi većeg promjera došlo do manjeg broja nepravilnosti, što je prikazano na slici 27.



Slika 28. Rezultati penetrantskog ispitivanja

4.2. Analiza makroizbruska

Nakon kontrole zavara penetrantima, CNC strojem za rezanje i zavarivanje zračnom plazmom izrezan je višak ploča zbog daljnjeg lakšeg manipuliranja tijekom obrade, prikazano slikom 28. Numerički upravljani stroj je VANAD PROXIMA, na kojeg je spojen uređaj za rezanje postupkom zračne plazme SPARCIN 900.



Slika 29. Rezanje viška dijelova ploča kutnog spoja

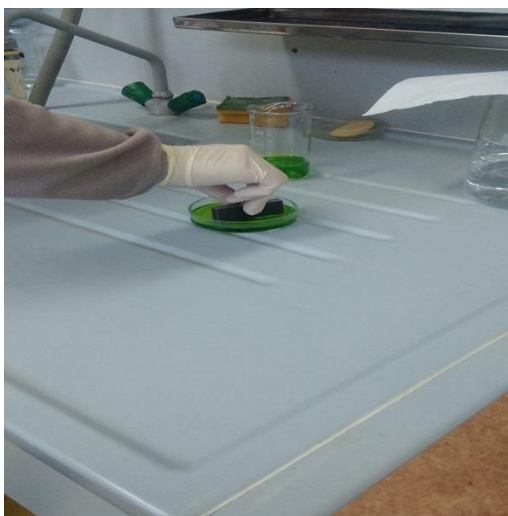
Sljedeći korak bio je izrezivanje makroizbruska tračnom pilom prikazano slikom 30. Rezanje je izvedeno na mjestu najbolje geometrije zavarenog spoja.



Slika 30. Rezanje makroizbruska tračnom pilom

Nakon rezanja makroizbrusak ručno je brušen do granulacije brusnog papira P500. Brušenje je bilo naizmjenično, odnosno makroizbrusak se okretao za 90^0 pri prelasku na višu granulaciju brusnog papira. Naknadno makroizbrusak je dodatno strojno poliran.

Nakon poliranja ispolirana strana makroizbruska bila je nagrizona u KALLING otopini broj 1. Trajanje procesa nagrivanja bilo je 25 sekundi, a prekid procesa izvršen je ispiranjem vrućom vodom. Prikaz nagrivanja površine makroizbruska prikazano je slikom 31.



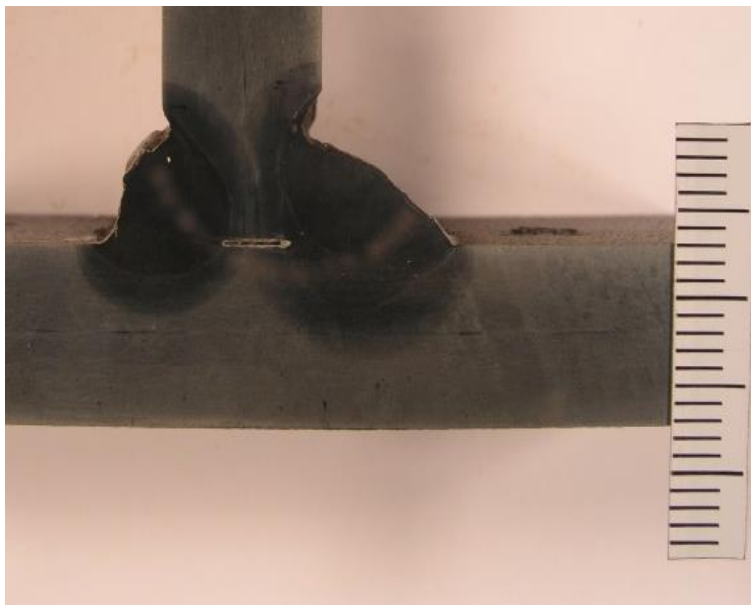
Slika 31. Nagrivanje površine makroizbruska otopinom KALLING

Kemijski sastav otopine KALLING:

- 33 ml H_2O
- 33 ml HCl
- 33 ml etilnoga alkohola
- 1,5 g CuCl (bakreni klorid).

Svrha nagrivanja površine presjeka makroizbruska je isticanje osnovnog materijala, zone utjecaja topline, linije staljivanja metala zavora i samog metala zavora. Postignut je kontrast između svih značajnih zona, odnosno jasniji prikaz presjeka zavorenog spoja te je olakšano kasnije mjerenje tvrdoće kao i analiza rezultata mokrog podvodnog zavarivanja.

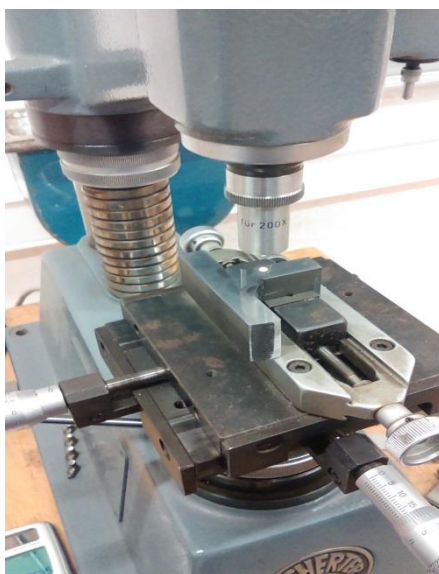
Na slici 32. prikazan je uzorak, odnosno presjek zavarenog kutnog spoja s mjernom skalom.



Slika 32. Makroizbrusak

4.3. Mjerenje tvrdoće i analiza rezultata

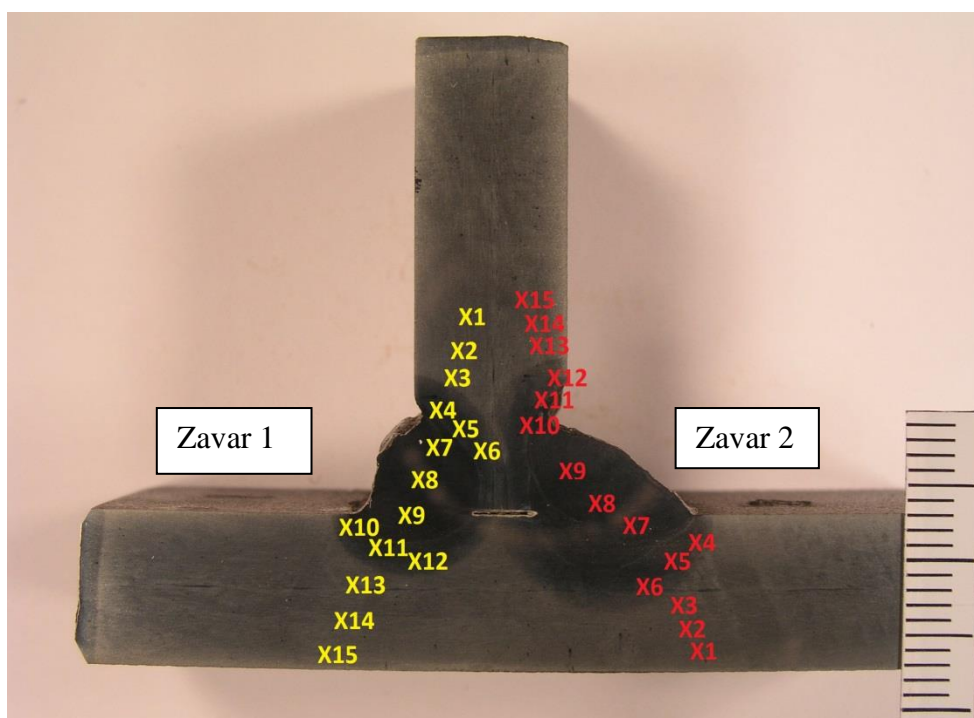
Ispitivanje tvrdoće i analiza rezultata provedeno je metodom po Vickersu (HV 10) uz primjenu sile od 10 kiloponda, odnosno 98,04 N. Uređaji za mjerenje tvrdoće nazivaju se tvrdomjeri, a tvrdomjer korišten u eksperimentu prikazan je na slici 33.



Slika 33. Tvrdomjer Reichert TM12

Trajanje utiskivanja opterećenja iznosilo je 10 s. Kod Vickersove metode tvrdoća se određuje veličinom otiska dijamantnog indentora u obliku četverostrane piramide s kutom od 136° između nasuprotnih stranica.

Mjerenje tvrdoće, može se koristiti kao kontrolni faktor za procjenu zavarljivosti. Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, metalu zavara i zoni utjecaja topline, prema shemi na slici 34. Na svakoj strani zavara napravljeno je po 15 mjerenja, odnosno 30 mjerenja na uzorku.



Slika 34. Raspored mjernih mjesta za ispitivanje tvrdoće na zavarenom spoju

U tablicama 5 i 6 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoća zavara 1, izvršenog elektrodom promjera 3,2 mm i zavara 2, izvršenog elektrodom promjera 4,0 mm.

Tablica 5. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća zavara 1

Mjerna točka	HV 10	MAKS. HV10
OM1	270	273
OM2	273	
OM3	272	
ZUT4	359	366
ZUT5	363	

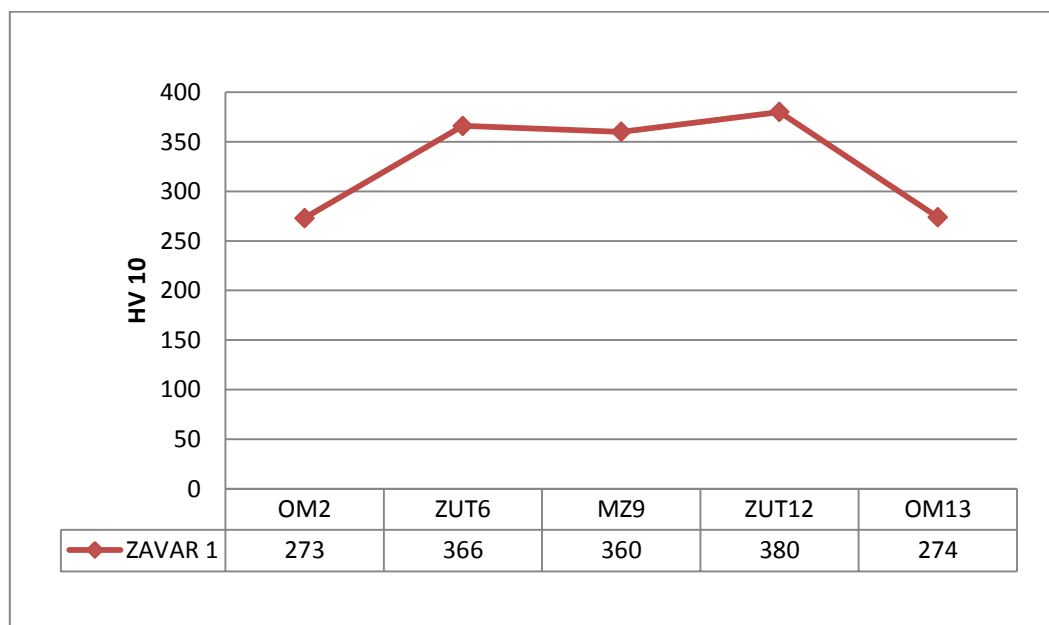
ZUT6	366	
MZ7	336	360
MZ8	339	
MZ9	360	
ZUT10	363	380
ZUT11	366	
ZUT12	380	
OM13	274	274
OM14	273	
OM15	269	

Tablica 6. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća zavara 2

Mjerna točka	HV10	MAX. HV10
OM1	273	274
OM2	269	
OM3	274	
ZUT4	364	376
ZUT5	376	
ZUT6	373	
MZ7	357	356
MZ8	336	
MZ9	339	
ZUT10	359	370
ZUT11	370	
ZUT12	368	
OM13	283	283
OM14	270	
OM15	267	

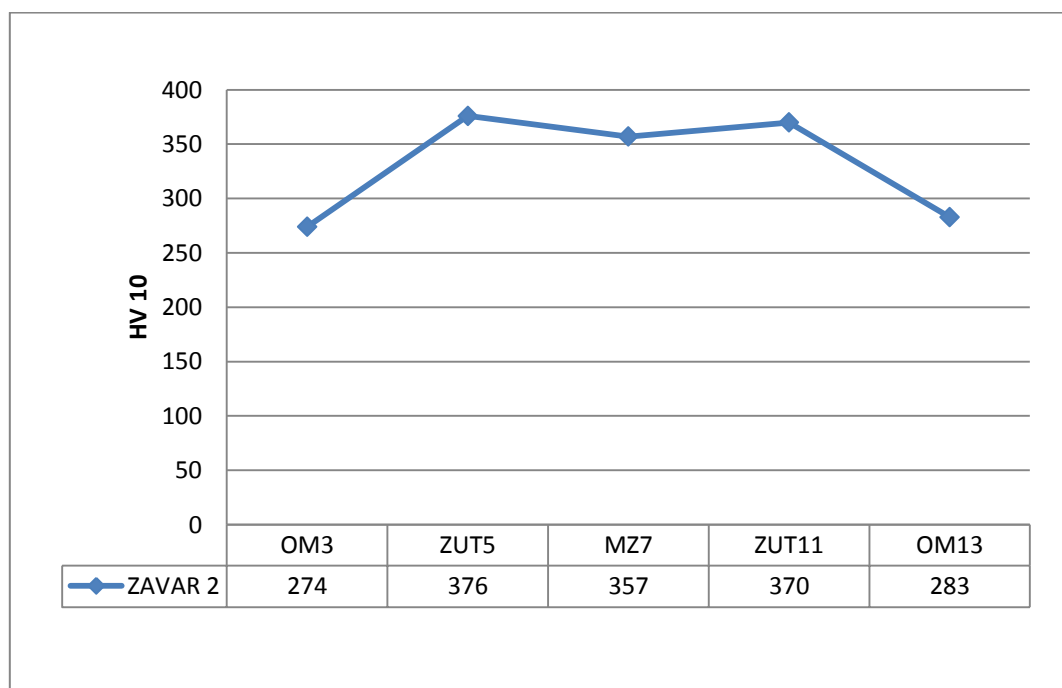
Iz oba mjerenja, po pojedinim mjestima, odnosno pozicijama uzete su najveće vrijednosti tvrdoće kako bi se onda moglo utvrditi odstupanja od zone do zone. Na slici 35 dan je profil izmjerenih vrijednosti tvrdoća zavara 1, dok je na slici 36 dan profil izmjerenih vrijednosti tvrdoća zavara 2.

Čelik X3CrNiMo13-4 prema normi HRN EN ISO 15614-1 pripada grupi čelika pod oznakom 7. Za tu grupu čelika u normi nije određena maksimalna dozvoljena vrijednost tvrdoće zavarenog spoja, već se mora analizirati i definirati postoje li neka značajnija odstupanja od izmjerenih vrijednosti [25].



Slika 35. Grafički prikaz tvrdoća zavara 1

Zavar 1 zavaren je elektrodom Lastek 1008 promjera 3,2 mm u jednom prolazu. Najveći iznosi tvrdoće izmjereni su u području ZUT-a, s maksimalnom vrijednošću od 380 HV10.



Slika 36. Grafički prikaz vrijednosti tvrdoća zavara 2

Zavar 2 zavaren je elektrodom Lastek 1008 promjera 4,0 mm u jednom prolazu. Unos topline bio je veći nego kod zavarivanja elektrodom promjera 3,2 mm. Cilj zavarivanja bio je definirati koji slučaj zavarivanja je prihvatljiviji za zavarivanje martenzitnog čelika. Budući da su tvrdoće ostale približno iste, ponegdje čak i iste, teško je zaključiti koji slučaj daje pogodniju mikrostrukturu i bolja mehanička svojstva. Također se mora napomenuti da se vrlo vjerojatno dio ZUT-a s jedne strane preklapa s drugim, pa je moguće da je došlo do dodatnog popuštanja na tom dijelu zavara materijala. Međutim, u tom pogledu potrebno je provesti daljnja i detaljnija istraživanja, kako bi se došlo do pouzdanog zaključka.

Što se tiče zavarljivosti, iz prethodnih tablica i grafova uočava se da je najveća tvrdoća u zoni utjecaja topline zavara 1. Naknadno uspoređujući tvrdoće osnovnog materijala i zone utjecaja topline, može se zaključiti kako nema iznimno visokih odstupanja, odnosno da je zavarljivost samog materijala prihvatljiva uz uvjete i parametre postavljene u ovom eksperimentu.

5. ZAKLJUČAK

Tehnologija zavarivanja usprkos tome što ima širok spektar izbora, kako samih postupaka spajanja, parametara, dodatnih materijala, osnovnih materijala, tako i tehnika rada, ponekad prisiljava na suženi izbor, a ponekad i na minimalni izbor prethodno navedenih faktora. Dobar primjer za to je mokro podvodno zavarivanje. U tom spektru zavarivanja, isključuje se podosta velika lepeza postupaka kojim se neki materijal može zavariti ili reparirati. Kao najrašireniji postupak mokrog podvodnog zavarivanja ističe se REL postupak. Izvodi se slično onome na suhom, uz male modifikacije izvora struje radi sigurnosti. Najveća razlika je u dodatnom materijalu, koji je podosta nadograđen s obzirom na dodatni materijal za suho REL zavarivanje. Provedena su detaljna istraživanja i eksperimenti kako bi se došlo do idealnog sastava elektrode, kao i njezine obloge, koji zajedno moraju što uspješnije olakšavati proces zavarivanja, kao i suzbijanje i smanjivanje negativnih pojava koje se javljaju kod mokrog podvodnog zavarivanja.

Osnovni problemi kod mokrog podvodnog zavarivanja su povećani sadržaj difundiranog vodika koji uzrokuje pukotine, a kontrolira se npr. reguliranjem unosa topline, jakosti struje, adekvatnim dodatnim materijalom, polaritetom, naponom zavarivanja i sl. Drugi jako bitan faktor je brzo hlađenje, budući da je radni komad u direktnom doticaju s vodom. Posljedice brzog hlađenja su povišene tvrdoće koje kasnije igraju bitnu ulogu u ocjeni kvalitete zavarenog spoja.

Zavarivanje martenzitnih čelika na suhom zahtijeva toplinsku obradu prije i poslije zavarivanja, kako bi se smanjila toplinska naprezanja, razlika temperatura zavara i osnovnog materijala. Također se i smanjuje mogućnost pojave vodikovih pukotina. Međutim, kod mokrog podvodnog zavarivanja toplinska obrada teško je izvediva, osim npr. toplinske obrade zavara višeprolaznim zavarivanjem.

Provedbom eksperimentalnog dijela, određeni su parametri zavarivanja martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4. Može se potvrditi da je REL postupak dobro proveden i da je adekvatan za zavarivanje ovakve vrste materijala. Budući da su kod ostvarivanja kutnog spoja korišteni različiti unosi topline, tj. dva stanja pokusa, očekivano je da će jedan od njih odstupati, odnosno pokazivati bolja ili lošija svojstva zavarenog spoja. Temeljem analize rezultata

tvrdća oba stanja pokusa, došlo se do zaključka da su svojstva jako slična. No ipak, preporučljivo je za ovu debljinu materijala koristiti elektrodu promjera 4 mm, jer dolazi do većeg protaljivanja, zavar je bolje geometrije, a ujedno kod većih promjera elektroda, potrebne su veće struje što automatski za posljedicu ima manji udio difundiranog vodika. Time se smanjuje mogućnost pojave hladnih pukotina. Budući da se zavarivanjem elektrodama većih promjera povećava i sam ZUT i to s obje strane, postoji velika vjerojatnost da se oni preklapaju, pa tu dolazi do popuštanja jednog ZUT-a drugim.

U aspektu zavarljivosti prema normi HRN EN ISO 15614-1 ne postoji egzaktni iznos granične tvrdoće kojom bi potvrdili je li materijal X3CrNiMo13-4 zavarljiv ili nije u uvjetima izvođenja eksperimenta. No, ukoliko nema značajnijih odstupanja u vrijednostima tvrdoća osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavara može se zaključiti da je materijal zavarljiv.

Temeljem provedenog eksperimenta može se potvrditi da u zadanim uvjetima čelik X3CrNiMo13-4 pokazuje zadovoljavajuću zavarljivost.

LITERATURA

- [1] Kralj, S., Kožuh, Z., Garašić, I.: *Stanje i trendovi u razvoju podvodnog zavarivanja*, Zavarivanje 48, 5/6, str. 153-165, Zagreb, 2005.
- [2] Juraga, I., Šimunović, V., Alar, V., Kehler, I., Stojanović, I.: *Čelici Cr-Ni i problemi korozijskih oštećenja izazvanih u vodi*, Zavarivanje, br. 50, 3/4, str 113-114, Zagreb, 2007.
- [3], *Napredovanje hiperbaričkog podvodnog zavarivanja do velikih dubina kao rezultat razvoja off shore tehnologije*, Zavarivanje, br. 29, , str. 287-295, Zagreb, 1986.
- [4] Fostervoll, H., Aune, R., Berge J.O., Woodward N. ; *Remotely Controlled Hyperbaric Welding of Subsea Pipelines*, 6th Pipeline Technology Conference, 2011.
- [5] <http://waterwelders.com/underwater-welding-history/>, 8.2.2017.
- [6] Garašić, I.: *Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju*, doktorski rad, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [7] <http://www.foundocean.com/en/what-we-do/strengthening-modification-and-repair/welding-and-weld-improvement/>, 9.2.2017.
- [8] Bal, M.: *Neki problemi kvalitete spojeva zavarenih pod vodom*, Zbornik radova: Zavarivanje u brodogradnji, HDTZ, Split 1986.
- [9] Smojver, A.: *Underwater welding in aggravating conditions*, Zbornik radova: Zavarivanje u pomorstvu, HDTZ, Krk, 1998.
- [10] ..., *U. S. Navy underwater cutting and welding manual*, Direction of commander, naval sea systems command, US, 2002.
- [11] Garašić, I., Kožuh, Z.: *Underwater welding and cutting*, Module of doctoral study: Advanced production technologies, Zagreb, 2016.
- [12] Szelagowski, P.: *Wet welding as a „serious“ rapair porcedure?*, Zbornik radova: Zavarivanje u pomorstvu, Haludovo, 1998.
- [13] Garašić, I.: *Predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“*, 2015.
- [14] David J.K.: *Underwater wet welding*, A welder's mate, TJ internatinal, Padstow, 2011.
- [15] Kralj, Slobodan., Kožuh, Z., Garašić, I.: *Utjecaj vodonepropusnog premaza na karakteristike zavarenih spojeva načinjenih u morskoj vodi*, Development of welding and allied processes at the beginning of the new millenium, HDTZ, Cavtat, 2001.

- [16] Mikulić, I.: *Analitički i eksperimentalni pristup određivanju zavarljivosti pri mokrom podvodnom zavarivanju*, diplomski rad, Zagreb, 2014.
- [17] Majumdar, J.D.: *Underwater welding-present status and future scope*, Technical note, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, 2006.
- [18] By Industrial Laser Solutions Editors: *Underwater laser welding for nuke plants coming to US*, <http://www.industrial-lasers.com/articles/2012/04/underwater-laser-welding-for-nyke-plants-coming-to-us.html>, 15.2.2017.
- [19] Kirk, A., Fraser, L.St.G.: *Optimization of Friction Stir Welding Tool*, <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/5/3435/htm>, 15.2.2017.
- [20] Kožuh, S.: *Specijalni čelici*, skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [21] Lippold, J.C., Kotecki D.J.: *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.
- [22] ASM Handbook: Volume 4, Heat Treating; ASM International, 1991.
- [23] Novosel, M.: *Martenzitni čelici s niskim udjelom ugljika*, Materijali u strojarstvu, HDMT, Zagreb, 1993.
- [24] ...: Norma HRN EN 10088-1:2007: *Nehrđajući čelici-1.dio: Popis nehrđajućih čelika*
- [25] ...: Norma HRN ISO 15614-1; *Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrokučno zavarivanje nikla i legura nikla*, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale, Ispitivanje postupka zavarivanja, 1. dio.
- [26] Lingaraju, D.: *A review on underwater friction stir welding modified with normal friction stir welding setup*, University College of Engineering, JNTUK, India, 2016.

PRILOZI

- I. CD-R disc – PDF verzija završnog rada